



João Pedro Proença Bento

**REAValiação DOS RECURSOS MINERAIS DE NIÓBIO NO
COMPLEXO CARBONATÍTICO MORRO DOS SEIS LAGOS,
AMAZONAS**

**Trabalho Final de Curso
(Geologia)**

UFRJ
Rio de Janeiro
2018



UFRJ

João Pedro Proença Bento

**REAValiação DOS RECURSOS MINERAIS DE NIÓBIO NO COMPLEXO
CARBONATÍTICO MORRO DOS SEIS LAGOS, AMAZONAS**

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, apresentado como requisito
necessário para obtenção do grau de
Geólogo.

Orientadores:

Claudio Gerheim Porto
Francisco José da Silva

Rio de Janeiro

Janeiro 2018

JOÃO PEDRO, Proença Bento

Título: Reavaliação dos recursos minerais de nióbio no complexo carbonatítico Morro dos Seis Lagos, Amazonas / João Pedro Proença Bento - - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2018.

xii, 050 p. : il.; 30cm

Trabalho Final de Curso (Geologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2018.

Orientadores: Claudio Gerheim Porto e Francisco José da Silva

1. Geologia. 2. Geologia Econômica – Trabalho de Conclusão de Curso. I. Claudio, Porto. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. III. Reavaliação dos recursos minerais de nióbio no complexo carbonatítico Morro dos Seis Lagos, Amazonas.

João Pedro Proença Bento

Reavaliação dos recursos minerais de nióbio do complexo carbonatítico Morro dos
Seis Lagos, Amazonas

Trabalho Final de Curso de Graduação em
Geologia do Instituto de Geociências,
Universidade Federal do Rio de Janeiro –
UFRJ, apresentado como requisito
necessário para obtenção do grau de
Geólogo.

Orientadores:

Claudio Gerheim Porto
Francisco José da Silva

Aprovada em: 26/02/2018

Por:

Orientador: Claudio Porto (UFRJ)

Marco Antonio da Silva Braga (UFRJ)

Roberto Albuquerque (UFRJ)

Agradecimentos

É uma realização muito grande saber que diversas pessoas colaboraram comigo ao longo de minha trajetória acadêmica na UFRJ.

Gostaria de agradecer aos meus pais, irmãos e avós, que sempre forneceram todo o suporte e tranquilidade para a realização do meu trabalho.

Ao meu orientador Claudio Porto por abrir as portas do projeto e me fornecer toda a atenção que fosse precisa.

Aos meus amigos Caíque Cabral, Gabriel Costa, Letícia Moura e Pedro Sá.

E à minha namorada Lorena Martins, que há dois anos faz parte do meu dia a dia e muito colaborou para a execução da minha monografia.

Resumo

BENTO, João Pedro Proença. Reavaliação dos recursos minerais de nióbio do complexo carbonatítico Morro dos Seis Lagos, Amazonas. 2018. xii, 050 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

No início dos anos 1970, o projeto RADAM identificou através de levantamento aéreo por radar 3 estruturas circulares no noroeste do estado do Amazonas. Em seguida, a CPRM realizou duas campanhas de exploração na área contendo mapeamento geológico, prospecção geoquímica e sondagem diamantada. Essas campanhas foram os projetos Seis Lagos (1976) e Uaupés (1983), que caracterizaram a área como uma crosta laterítica de profundidades superiores a 255m situada sobre rocha carbonatítica. Durante a lateritização, diversos metais foram concentrados, a se destacar o Nióbio, cujo volume foi calculado pelo Projeto Uaupés: 2,89 Bt de minério a 2,81% de Nb_2O_5 divididos em recursos medido, indicado e inferido. A partir de 2012, a CPRM retomou o estudo na área pelo Projeto Terras Raras, realizando reamostragem, redescrição de testemunhos e reanálise química. Os dados analíticos obtidos foram utilizados no presente trabalho para realizar um novo cálculo dos recursos de Nióbio da área. A partir da aplicação de modelos estatísticos, verificou-se que a população dos dados mais recentes de análises apresentam aumento médio de 10,72% de teor de Nb_2O_5 , além de maior precisão analítica comparando com os dados utilizados pela CPRM em 1983. Foi realizado então um novo cálculo dos recursos medido e indicado de Nb_2O_5 (%) utilizando os novos dados, mais precisos, além de acrescentar ao volume de recursos medidos a área de influência de mais um furo de sondagem. Como resultado, foi obtido um aumento de 38,4 Mt para 45,6 Mt no volume de recurso medido (18,76%). Em seguida, foi apresentada uma curva de parametrização teor x tonelagem mostrando diferentes hipotéticos cenários de teores de corte para uma eventual futura lavra no local, servindo como base para os próximos passos na exploração mineral da área.

Palavras-chave: Nióbio; Crosta laterítica.

Abstract

BENTO, João Pedro Proença. Revaluation of the Niobium mineral resources of the Morro dos Seis Lagos carbonatitic complex, Amazonas. 2018. xii, 050 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

In the beginning of the 1970 decade, the RADAM project identified by radar three circular structures in the northwest of Amazonas State. Later, CPRM executed two exploration campaigns in the area, including geological mapping, geochemical prospection and drill holes. These campaigns were called Seis Lagos (1976) and Uaupés (1983) projects, that defined the area as a laterite reaching depths beyond 255 meters that overlies a carbonatitic rock. During the laterization process multiple metals were concentrated, including Niobium, which volume was calculated by the Uaupés project: 2,89 Bt ore at 2,81% Nb₂O₅ divided in measured, indicated and inferred resources. In 2012, CPRM restarted studying the area in the project called Terras Raras, that included resampling, redescription and reanalysis. The obtained analytic data was used in the current work to recalculate the Niobium resources of the area. As a result of applying statistical models, it was possible to identify that the newer data show an increase of 10,72% of the Nb₂O₅ content, besides better analytical precision in comparison with the CPRM data utilized in 1983. Then, a new calculation of the measured and indicated Nb₂O₅ resources was made using the newer data, besides adding the influence area of another drill hole to it. As result, it was obtained an increase from 38,4 Mt to 45,6 Mt in the measured resources (18,76%). Then, it was possible to build a graphic showing different tonnages and grades in several hypothetical cut-off values that can be used as base for the next steps of mineral exploration in the area.

Key-Words: Niobium; Laterite.

Lista de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mapas de localização da área de estudo. Em (A), o ponto vermelho indica a localização exata do Morro dos Seis Lagos no Continente Sul-americano. Mapa retirado do Google Maps. Acesso em 26/12/2017. Em (B), imagem aérea da área do Morro, obtida a partir do <i>Basemap</i> da ESRI, no Software ArcGIS Map. | 2 |
| Figura 2. Principais províncias geocronológicas e domínios tectono-estratigráficos do Cráton Amazônico (CPRM, 2006). | 3 |
| Figura 3. Mapa geológico da área de estudo, mostrando as alcalinas de Seis Lagos em contato com as rochas do Complexo Cauaburi. Carta geológica do Brasil ao Milionésimo NA.19 – Pico da Neblina. Retirado de GeoSBG/CPRM. | 4 |
| Figura 4. Distribuição global de carbonatitos (extraído de Woolley & Kjasgaard, (2008)). | 7 |
| Figura 5. Proposta de coluna estratigráfica para a região das folhas Folhas NA.19-Z-D e AS.19-X-B, modificado de Viegas Filho & Bonow 1976. | 8 |
| Figura 6. Elevação e principais morfoestruturas no entorno dos Morros dos Seis Lagos, Meio e Norte (A) e estruturas presentes na superfície do Morro dos Seis Lagos (B). Retirado de Rossoni (2016). | 12 |
| Figura 7. Mapa geológico modificado de Viegas Filho & Bonow (1976). | 13 |
| Figura 8. Perfil da crosta laterítica amostrada no furo 1-SG-01 do Projeto Seis Lagos. Modificado de Giovannini (2017). | 17 |
| Figura 9. Feições microscópicas dos minerais presentes no Morro dos Seis Lagos. (A) Cristais de Monazita com zonas ricas em Monazita envoltos por matriz rica em Gorceixita, cortados por um veio de Barita (Siderita-Carbonatito no furo 1-SG-02-AM). (B) Goethita maciça envolta por banda hematítica e Goethita fibrosa (Laterita Fragmentada). (C) Cristal de Nb-Rutilo zonado (Laterita Fragmentada). (D) Hollandita, Cerianita e Pirolusita (Laterita Manganesífera). (E) Fragmento subarredondado de Hematita envolto por massas hematíticas e Nb-Rutilo. (Laterita Fragmentada). (F) Esférula de Brookita apresentando anéis de Liesegang (Laterita Roxa). | 18 |
| Figura 10. Modelo de evolução geológica do Morro dos Seis Lagos. Modificado de Justo (1983). | 20 |
| Figura 11. Posicionamento da malha geoquímica de solo e furos de sondagem realizados durante os projetos Seis Lagos e Uaupés. Imagem retirada do software ArcGIS da ESRI, utilizando o mapa base do mesmo como fundo, representando a feição morfológica do Morro dos Seis Lagos. | 24 |
| Figura 12. Em azul, Reserva Biológica Estadual Morro dos Seis Lagos; em vermelho, terras indígenas; em amarelo, Parque Nacional do Pico da Neblina. Disponível: < https://uc.socioambiental.org/uc/4738 >. Acesso em 27/12/2017. | 26 |
| Figura 13. Reta RMA comparando os dados obtidos pelo Projeto Uaupés (Eixo X) com o Projeto Terras Raras (Eixo Y), ambos da CPRM. A comparação foi realizada para teores lidos na mesma amostra. | 30 |
| Figura 14. Reta RMA comparando teores de Nb ₂ O ₅ (%) lidos em pares de amostras e duplicatas pelo laboratório SGS Geosol para o Projeto Terras Raras. | 33 |
| Figura 15. Em azul: leituras do padrão em diferentes datas. Em amarelo o valor certificado para a amostra. A faixa verde corresponde ao intervalo de 95% de confiança. | 37 |
| Figura 16. Em azul: leituras do padrão em diferentes datas. Em amarelo o valor certificado para a amostra. A faixa verde corresponde ao intervalo de 95% de confiança. | 37 |
| Figura 17. Vista em 3-D de sub-bloco unitário para recurso medido. | 40 |

| | |
|--|----|
| Figura 18. Vista em perfil do Morro dos Seis Lagos com a separação de recurso medido, indicado e inferido. Modificado de Justo (1983) por Lucy Takehara Chemale. | 41 |
| Figura 19. Vista em planta das áreas de recurso medido e indicado, ressaltando a porção sob influência do furo 01-SG-AM realizado no Projeto Seis Lagos que foi acrescentada a área de recurso medido previamente definida no Projeto Uaupés. | 42 |
| Figura 20. Vista em planta das áreas de recurso medido e indicado, ressaltando a porção sob influência do furo 01-SG-AM realizado no Projeto Seis Lagos que foi acrescentada a área de recurso medido previamente definida no Projeto Uaupés. | 43 |
| Figura 21. Comparação dos volumes de Nb ₂ O ₅ contidos nos cálculos do Projeto Uaupés com o presente trabalho..... | 44 |
| Figura 22. Curva de Parametrização Teor x Tonelagem. | 45 |

Lista de tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1. Cálculo de cubagem para recursos de Nb no Projeto Uaupés. | 23 |
| Tabela 2. Comparação entre valores obtidos no Projeto Uaupés e valores corrigidos pela equação da reta RMA | 31 |
| Tabela 3. Precisão analítica dos levantamentos geoquímicos dos Projetos Uaupés e Terras Raras | 35 |
| Tabela 4. : Síntese do cálculo de recursos do Projeto Uaupés e do presente trabalho. | 43 |
| Tabela 5. Comparação dos teores médios dos projetos Uaupés e Terras Raras. | 44 |
| Tabela 6. Recurso total (Mt), Teor médio Nb ₂ O ₅ (%) e Nb ₂ O ₅ contido (Mt) para diferentes teores de corte | 45 |

Lista de Quadros

| | |
|---|----|
| Quadro 1. Parâmetros obtidos pela reta RMA da Figura 8..... | 30 |
| Quadro 2. Parâmetros da reta RMA. | 33 |

Sumário

| | |
|--|------|
| Agradecimentos | vi |
| Resumo | viii |
| <i>Abstract</i> | ix |
| Lista de figuras | x |
| Lista de tabelas | xi |
| 1 INTRODUÇÃO | 1 |
| 2 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS | 2 |
| 3 CONTEXTO GEOLÓGICO | 3 |
| 3.1 Geologia Regional | 3 |
| 3.1.1 Província Rio Negro | 4 |
| 3.1.1.1 Domínio Imeri | 5 |
| 3.2 Carbonatito | 6 |
| 3.3 Coluna Estratigráfica | 7 |
| 3.4 Geologia da Área | 11 |
| 3.4.1 Estrutural | 11 |
| 3.4.2 Mapa geológico | 12 |
| 3.4.3 Litologias | 13 |
| 3.4.4 Mineralogia | 18 |
| 3.4.4.1 Minerais de minério de Nióbio | 18 |
| 3.4.5 Modelo de Evolução | 19 |
| 4 HISTÓRICO DE EXPLORAÇÃO | 21 |
| 4.1 Projeto RADAM | 21 |
| 4.2 Projeto Seis Lagos | 21 |
| 4.3 Projeto Uaupés | 22 |
| 4.4 Projeto Terras Raras | 23 |
| 4.5 Restrições da Exploração | 25 |
| 5 METODOLOGIA | 27 |
| 5.1 Base de Dados | 27 |
| 5.2 Comparação de Dados | 27 |
| 5.3 Controle de Qualidade Analítica (QAQC) | 28 |
| 5.4 Cálculo de Cubagem | 28 |
| 5.5 Curva de Parametrização Teor x Tonelagem | 28 |
| 6 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 29 |
| 6.1 Comparação de Dados | 29 |
| 6.2 Controle de Qualidade Analítica (QAQC) | 32 |
| 6.2.1 Comparação dos dados dos projetos Uaupés e Terras Raras a partir da reta RMA | 32 |
| 6.2.2 Cálculo da precisão analítica dos levantamentos geoquímicos ... | 35 |
| 6.2.3 Aferição da qualidade dos teores lidos em amostras-padrão | 36 |
| 6.2.4 Cálculo dos Recursos Minerais de Nb e ETR | 38 |
| 6.3 Projeto Uaupés | 38 |
| 6.4 Cálculo dos recursos de Nb | 41 |
| 6.5 Curva de Parametrização Teor x Tonelagem | 45 |
| 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES | 46 |
| 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 48 |

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui as maiores reservas e é o maior produtor de Nióbio (Nb) do mundo, representando mais de 90% da produção mundial (Pereira Junior, 2016). Este elemento é utilizado principalmente para a produção de ligas de aço, conferindo maior resistência mecânica e tenacidade às mesmas (Carneiro, 2016). Descoberto na década 70 pelo projeto RADAM, o Complexo Carbonatítico Morro dos Seis Lagos foi descrito pela CPRM nos anos 80 como o maior depósito de Nióbio do mundo, contendo aproximadamente 2,89 bilhões de toneladas de minério com teor médio de 2,81% de Nb_2O_5 (Justo, 1983).

No que diz respeito a exploração na área, 4 grandes projetos merecem ser destacados: o Projeto RADAM (Pinheiro *et al.*, 1976), do início dos anos 70, que através de levantamento aéreo por radar descobriu três estruturas circulares, despertando o interesse do DNPM, que por sua vez encaminhou solicitação para a CPRM realizar um levantamento geológico na área, denominado Projeto Seis Lagos (Viegas Filho & Bonow, 1976). Subsequentemente foi implantado o Projeto Uaupés (Justo, 1983), cujo objetivo foi realizar um cálculo dos recursos de Nb da área, constatando a maior reserva mundial deste elemento. A partir de 2012 a CPRM implantou o projeto Terras Raras, no qual os trabalhos de exploração na área foram retomados visando avaliar potencial do morro de 6 lagos para elementos Terras Raras. Este projeto ainda está em andamento e não possui relatório final publicado.

O presente trabalho tem como objetivo reavaliar os dados analíticos dos projetos Seis Lagos (1976) e Uaupés (1983), incluindo novos dados analíticos obtidos em 2012 e 2013 pela CPRM durante a execução do Projeto Terras Raras, com o intuito de realizar um novo cálculo de cubagem dos recursos minerais de Nióbio.

2 LOCALIZAÇÃO E ACESSOS

O Morro dos Seis Lagos localiza-se no município de São Gabriel da Cachoeira, no noroeste do estado do Amazonas (Figura 1). A partir da cidade de Manaus, o acesso ao município se dá por via aérea (850 km) ou fluvial, através do Rio Negro (1000 km). A partir do centro de São Gabriel da Cachoeira segue-se pela BR-307 por cerca de 65 km até a ponte sobre o Igarapé Iá-Mirim, onde é preciso seguir por meio de embarcação pequena até o sopé do Morro dos Seis Lagos.

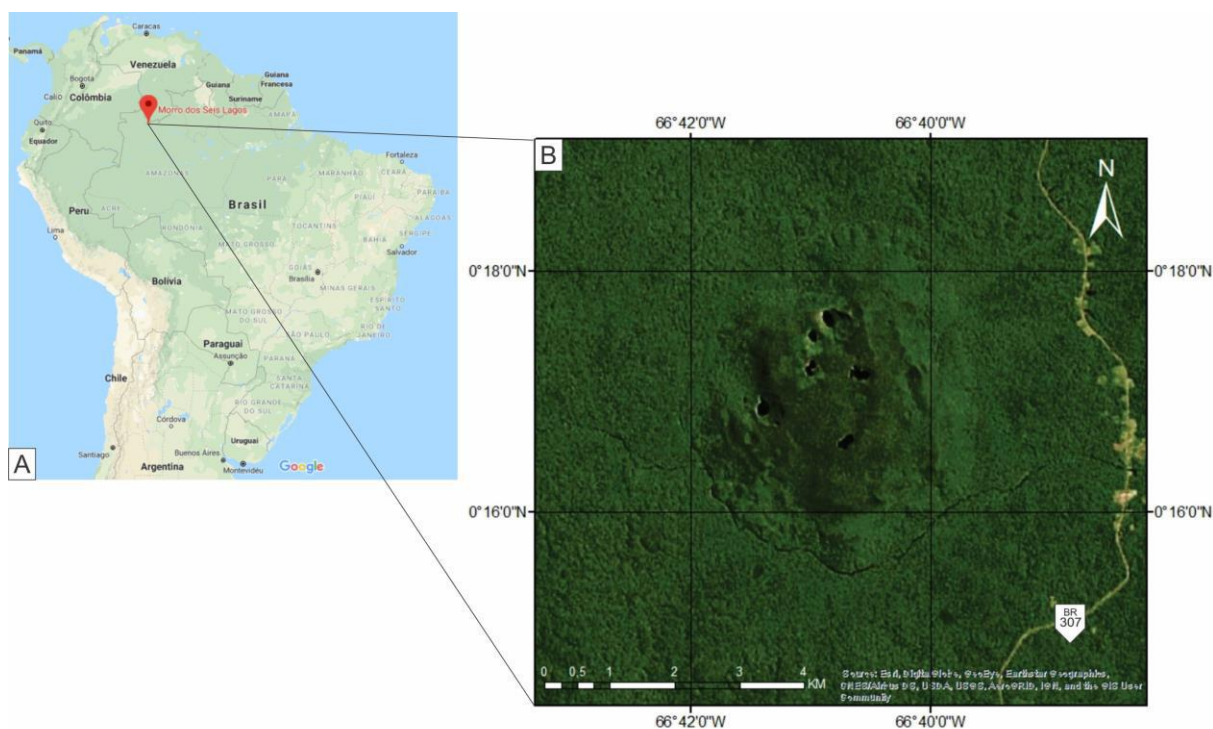


Figura 1. Mapas de localização da área de estudo. Em (A), o ponto vermelho indica a localização exata do Morro dos Seis Lagos no Continente Sul-americano. Mapa retirado do Google Maps. Acesso em 26/12/2017. Em (B), imagem aérea da área do Morro, obtida a partir do *Basemap* da ESRI, no Software ArcGIS Map.

3 CONTEXTO GEOLÓGICO

3.1 Geologia Regional

O Cráton Amazônico é dividido em duas principais áreas de idade pré-cambriana: Escudo das Guianas ao norte da Bacia do Amazonas e Escudo Brasil-Central ao sul (Almeida & Hasui, 1984). Já em 2006, a CPRM apresentou uma proposta de divisão em províncias geocronológicas e domínios tectono-estratigráficos, que serviu como base para o presente estudo.

As rochas alcalinas do Morro dos Seis Lagos estão inseridas no Domínio Imeri da Província Rio Negro (CPRM, 2006) como representado na Figura 2.

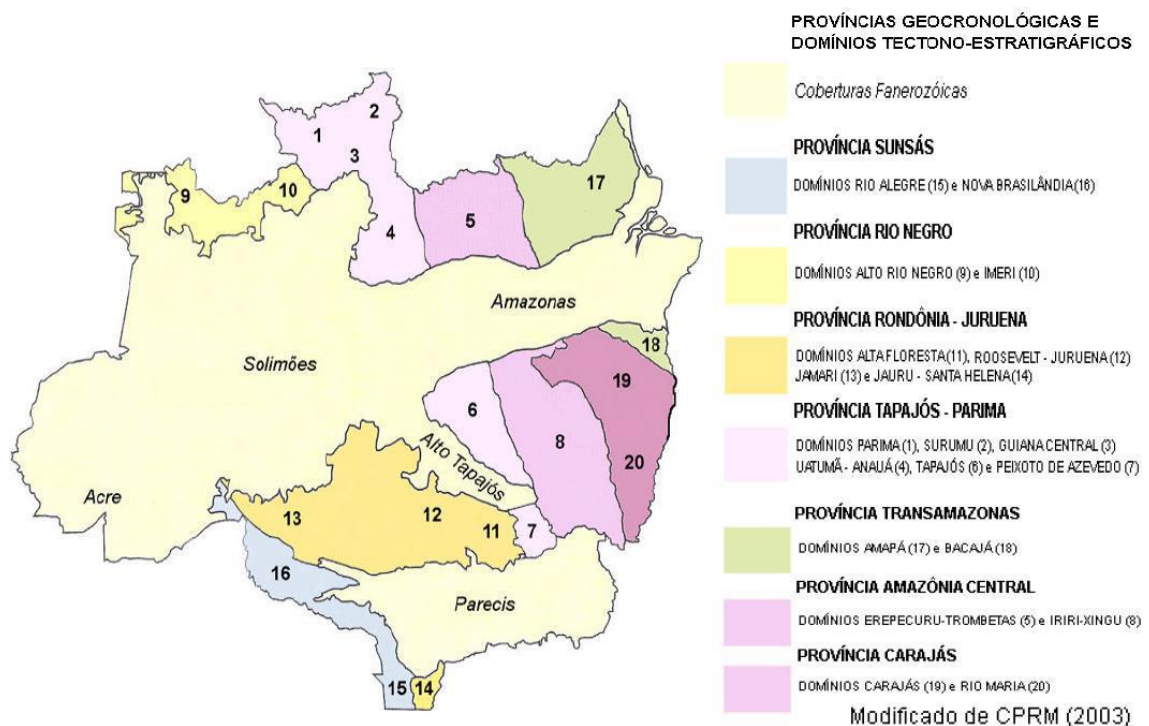


Figura 2. Principais províncias geocronológicas e domínios tectono-estratigráficos do Cráton Amazônico (CPRM, 2006).

3.1.1 Província Rio Negro

A Província Rio Negro (Santos *et al.*, 2000) se localiza no noroeste do Cráton Amazônico e do estado do Amazonas, próximo à fronteira do Brasil com Venezuela e Colômbia (Figura 3), e é subdividida em dois domínios tectono-estratigráficos: Alto Rio Negro, a oeste, e Imeri, a leste.

Esta província é interpretada como sendo produto de reciclagem tectono-magmática de crosta pré-existente (Santos *et al.*, 2000) ou arco magmático relacionado a subducção de crosta oceânica (Tassinari & Macambira, 1999). As duas propostas sugerem que houve reciclagem de crosta continental pré-existente durante o estágio colisional com: (i) geração de granitóides tipo S tardi a pós-colisionais em 1,52 Ga; (ii) intrusões de assinatura tipo A entre 1,51-1,49 Ga em ambiente pós-orogênético condicionadas pela reativação das estruturas NE-SW de NW-SE em torno de 1,30-1,10 Ga pelo Evento K'Mudku (CPRM, 2006).

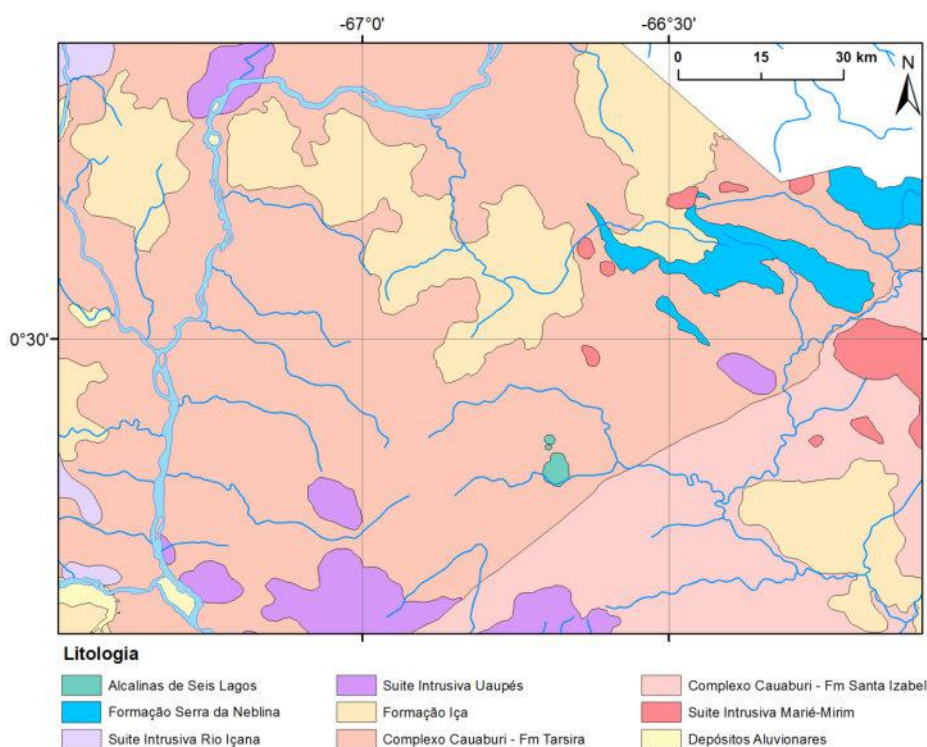


Figura 3. Mapa geológico da área de estudo, mostrando as alcalinas de Seis Lagos em contato com as rochas do Complexo Cauaburi. Carta geológica do Brasil ao Milionésimo NA.19 – Pico da Neblina. Retirado de GeoSBG/CPRM.

3.1.1.1 Domínio Imeri

Segundo CPRM (2006), o domínio Imeri apresenta direção preferencial estrutural NE-SW marcado pelas Serras Urucuzeiro, Imeri e Tapirapecó, além de faixas internas com deformação heterogênea desenvolvida no seu embasamento, evidenciada por lineamentos associadas a grandes zonas de cisalhamento. A direção NW-SE ocorre de forma mais restrita marcada pelas serras Curupira e Aracá, demonstrando forte inflexão na proximidade do contato com a principal direção NE-SW da região.

De acordo com Almeida & Pinheiro (2002), o embasamento do domínio Imeri é representado pelo Complexo Cauaburi, composto pelas litofácies Santa Izabel do Rio Negro (leste) e Tarsira (oeste). Localmente, o complexo atinge a fácies anfibolito de metamorfismo, sendo constituído principalmente por magmatismo de caráter cálcio-alcálico expandido, embora predominem termos mais félsicos representados por (meta)granitóides e gnaisses com idades de cristalização em torno de 1,8 Ga (Santos *et al.*, 2000).

Segundo CPRM (2006), o domínio também é caracterizado por intrusões graníticas do tipo A representado pelas suítes Maraujá e Marié-Mirim no intervalo 1,76-1,75 Ga, registrando ainda evidências de heranças de 1,80-1,78 Ga relacionadas ao embasamento Cauaburi. Este evento magmático pode representar um estágio extensional posterior ao fim do evento orogênico gerador das rochas do Complexo Cauaburi.

Os granitos tipo S da suíte Igarapé Reilau apresentam granitogênese gerada pelo espessamento crustal causado pela deformação e metamorfismo relacionados ao evento K'Mudku (1,34-1,00 Ga) (Santos *et al.*, 2006a).

A Formação Aracá registra uma deformação que atingiu a fácies xisto verde, e localmente fácies anfibolito. Essas rochas metassedimentares apresentam tramas deformacionais ao longo de zonas de cisalhamento dúctil sob condições da fácies xisto verde,

que também encontram-se registradas nos granitóides dos tipos S e A, evidenciando a atuação de um episódio deformacional heterogêneo, provavelmente de idade grenvlliana.

O Granito Jauari é representado por um corpo circular do tipo I, cálcio-alcálico com alto-K, aparentemente intrusivo na Formação Aracá. Possui idade U-Pb de 1,48 Ga e não demonstra sinais de deformação e metamorfismo.

Por fim, CPRM (2006) também caracteriza o domínio Imeri por intrusões máficas-ultramáficas, representadas pela suíte Tapuruquara, além das chaminés vulcânicas (Carbonatito Seis Lagos), de filiação alcalino-carbonatítica de idade Mesozóica, bem como os diques de diabásio correlacionados ao Diabásio Uaraná do Eo-Jurássico ao Neo-Triássico.

Rossoni (2017), em seu trabalho de investigação geocronológica por U-Pb em zircões das litologias encontradas no Morro dos Seis Lagos, publicou uma proposta mais precisa de idade para a intrusão carbonatítica presente na área. Os resultados obtidos em cristais de zircão coletados de amostras do carbonatito levaram o autor a propor 1328 ± 58 Ma como idade máxima de cristalização do carbonatito, o que leva a crer que a gênese do mesmo esteja relacionada ao evento K'Mudku. Desde o Projeto Seis Lagos (Viegas Filho & Bonow, 1976), não se sabia com precisão onde posicionar as rochas intrusivas na escala do tempo geológico, sendo atribuída sempre idade Mesozóica.

3.2 Carbonatito

Segundo o Serviço Geológico Americano (USGS), carbonatitos são definidos como rochas ígneas que contêm em sua mineralogia primária mais de 50%, em volume, de minerais carbonáticos e ao menos 20% em peso de SiO_2 .

Existem ocorrências de carbonatitos registradas em todo o globo (Figura 4) desde o Paleoproterozóico até o recente, com maior concentração no Mesozóico.

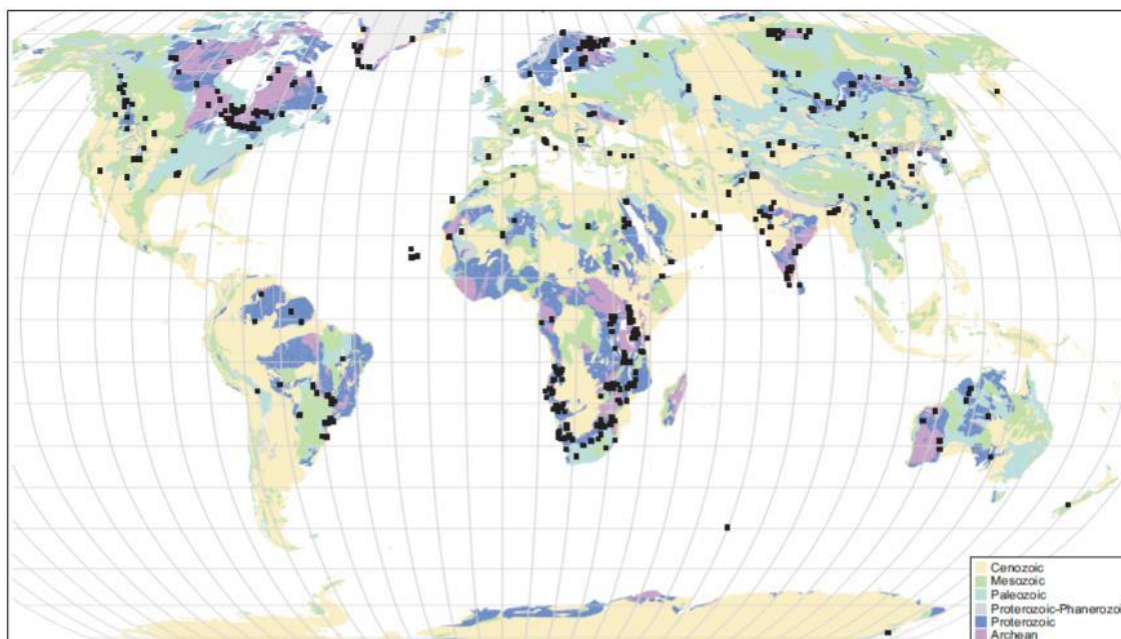


Figura 4. Distribuição global de carbonatitos (extraído de Woolley & Kjasgaard, (2008)).

No que se refere a contexto tectônico, carbonatitos são localizados em terrenos continentais estáveis como escudos e crátons, localizados em crosta antiga e bem desenvolvida. Dentro dessas estruturas, as intrusões carbonatíticas estão associadas a províncias magmáticas alcalinas controladas por sistemas de rifte intracontinental e zonas de falha (Berger *et al.*, 2009).

Carbonatitos são uma das maiores fontes naturais de Elementos Terras Raras (ETR) e Nióbio presentes na natureza, sendo que os principais minerais de minério são: Pirocloro, Nb-Rutilo e Nb-Ilmenita e Monazita (Berger *et al.*, 2009).

3.3 Coluna Estratigráfica

As rochas da região das folhas NA.19-Z-D/AS.19-X-B, nas quais o Morro dos Seis Lagos está localizado, foram dispostas em coluna estratigráfica apresentada no relatório final do Projeto Seis Lagos (Figura 5).

| ERA | PERÍODO | ÉPOCA | UNIDADE LITOESTRATIGRÁFICA | | LITOLOGIA |
|--------------|---------------|--------------------------------|---------------------------------|--|--|
| CENOZÓICO | QUARTENÁRIO | HOLOCENO | DEPÓSITOS RECENTES | ALUVIÕES | AREIA DE PRAIAS |
| | | | | FLUVIÕES | SEDIMENTOS PANTANOSOS |
| | TERCIÁRIO | PLEISTOCENO | COLUVIÕES | DEPÓSITOS DE TALUS | |
| | | | QUARTENÁRIO INDIFERENCIADO | COBERTURAS ARENOSAS E ARGILOSAS COM CONCREÇÕES LATERÍTICAS | |
| | | | SEDIMENTOS DE BACIAS INTERIORES | ARGILA CARBONOSA, RITMITO E BRECHAS | |
| | INFERIOR | COBERTURA FERRÍFERA SEIS LAGOS | CANGA LATERÍTICA | | |
| MESOZÓICO | CRETÁCEO | | ALCALINA SEIS LAGOS | ? | SIENITO(?), CARBONATITO(?) E ULTRABÁSICAS ALCALINAS(?) |
| | JURÁSSICO | | | | |
| | TRIÁSSICO | | | | |
| PALEOZÓICO | | | INTRUSIVAS BÁSICAS | | DIQUES BÁSICOS |
| PROTEROZÓICO | PRÉ-CAMBRIANO | SUPERIOR | CATACLASITOS K'MUNDKU | | CATACLASITOS E MILONITOS |
| ARQUEOZÓICO | | MÉDIO | FORMAÇÃO RORAIMA | | ARENITOS, ARENITOS ORTOQUARTZÍTICOS E CONGLOMERADOS |
| | | INFERIOR A MÉDIO | SEQUÊNCIA GRANITO-GNÁISSICA | | GRANITOS, ADAMELITOS, GRANODIORITOS, GNAISSES E MIGMATITOS |

Figura 5. Proposta de coluna estratigráfica para a região das folhas Folhas NA.19-Z-D e AS.19-X-B, modificado de Viegas Filho & Bonow 1976.

Viegas Filho & Bonow (1976) dividiram as rochas da região em 9 unidades litoestratigráficas, brevemente descritas a seguir:

- **Sequência Granítico-gnáissica:** Complexo de rochas que constitui o embasamento cristalino da região do Alto Rio Negro. Os litótipos mais recorrentes são migmatitos, granitos, gnaisses, granodioritos e sienitos. Estas rochas se encontram comumente alteradas, com manto de alteração chegando a 20 metros de espessura. A estas rochas foi atribuída idade Pré-Cambriano Inferior a Médio. Pinheiro *et al.* (1976) realizou datações que forneceram idades em torno de 1,5 bilhão de anos. Esta sequência descrita representa as rochas do Complexo Cauaburi.
- **Formação Roraima:** Arenitos e conglomerados intercalados com arenitos conglomeráticos ferruginosos, tufos e grauvas feldspáticas (Bomfim *et al.*, 1974). A idade proposta para a Formação Roraima é Pré-Cambriano médio, a partir de datações radiométricas efetuadas por Mandetta (1970) em rochas vulcânicas ácidas sotopostas à

Formação Roraima e em vulcânicas intrusivas na mesma, que forneceu idades em torno de 1,6 bilhão de anos.

- **Cataclasitos K'Mudku:** Barron (1966) reconheceu no território da República da Guiana um evento tectono-termal desenvolvido entre 1,1 e 1,2 bilhão de anos, denominado “*K'Mudku Milonite Episode*”. Este evento desenvolveu amplas faixas de milonitos e cataclasitos. Em território brasileiro, no estado de Roraima há também evidências deste mesmo evento, do qual as rochas foram denominadas Cataclasitos K'Mudku. Na área que circunda o Morro dos Seis Lagos, ocorrem duas faixas de cataclasitos onde falhas na direção NE-SW cortam a área. Datações realizadas por Pinheiro *et al.* (1976) no Projeto RADAM forneceram idades de em torno de 1,1 bilhão de anos.
- **Intrusivas básicas:** Técnicos do Projeto RADAM (Pinheiro *et al.*, 1976) identificaram a ocorrência de diques básicos encaixados em rochas do embasamento na área da folha NA.19-Z-D, na qual está inclusa a área de estudo. Não foram observadas rochas dessa natureza na estrutura do Morro dos Seis Lagos, o que indica gênese anterior ao mesmo.
- **Alcalinas Seis Lagos:** Algumas evidências levaram Viegas Filho & Bonow (1976) a classificar a intrusão de Seis Lagos como rochas alcalinas, sendo essas: (i) Formato circular comum a outros complexos alcalinos conhecidos; (ii) Altos teores de elementos comumente encontrados em rochas alcalinas como Nb, Zr, V e Be; (iii) Presença de veios carbonatados nas bordas da estrutura. Estas rochas alcalinas estão encaixadas nas granítico-gnáissicas do embasamento, e a idade proposta para as

mesmas na coluna estratigráfica é Mesozóica. No Projeto Uaupés (1983), no entanto, é levantada a possibilidade da intrusão ser datada do Pré-Cambriano Superior, principalmente por afirmar que as falhas transcorrentes que se cruzam na região do Morro dos Seis Lagos parecem estar relacionadas ao evento K'Mudku, de idade entre 1,1 e 1,2 bilhão de anos. Rossoni (2017) obteve através de datação por U-Pb em zircões a idade de $1328 \text{ Ma} \pm 58 \text{ Ma}$ para o carbonatito, fato que portanto modifica a posição desta litologia na coluna litoestratigráfica proposta por Viegas Filho & Bonow (1976).

- **Cobertura Ferrífera Seis Lagos:** Litologia predominante no topo dos Morros dos Seis Lagos, Meio e Norte. Trata-se de uma rocha porosa com aspecto brechoidal ou maciço e predominância de Hematita. Não se sabe ao certo a espessura desta crosta, no entanto o furo 1-SG-01-AM do Projeto Seis Lagos perfurou 255m deste material. A idade proposta de formação deste perfil laterítico residual é Terciário Inferior.
- **Sedimentos de bacias interiores:** Argilas carbonosas, calcíferas, ritmitos e brechas presentes no Lago Esperança, local do furo 1-SG-04-AM, foram classificados como sedimentos de bacias interiores no Projeto Seis Lagos. Além desta localidade, há a ocorrência deste material em outros pontos, descritos como antigos lagos assoreados.
- **Quaternário Indiferenciado:** Depósitos sedimentares quaternários expostos à meteorização, tais quais areias, argilas e siltitos, que ocorrem capeando grande parte das rochas do embasamento da região.
- **Depósitos recentes:** Sedimentos inconsolidados como coluviões, eluviões e aluviões datados do Holoceno.

3.4 Geologia da Área

Durante o Projeto Seis Lagos, Viegas Filho & Bonow (1976) realizaram descrição petrográfica tanto das amostras coletadas em afloramentos quanto em testemunhos, chegando a conclusão de que a estrutura do Morro dos Seis Lagos está associada a um complexo carbonatítico de idade Mesozóica. No entanto, após datações realizadas por Rossoni (2017), a idade considerada para a intrusão passou a ser de 1328 ± 58 Ma.

3.4.1 Estrutural

Este corpo carbonatítico, descrito por Giovannini (2017) como um siderita-carbonatito, teve seu posicionamento controlado por uma grande estrutura de direção E-W (400km), estando o Morro dos Seis Lagos localizado na interseção desta com outras duas, de direção NE-SW e SW-NE (Rossoni, 2016), como visto na Figura 6.

As principais direções de estruturas regionais se refletem em estruturas rúpteis presentes na superfície do Morro dos Seis Lagos (Figura 6b), que provavelmente controlaram o processo de carstificação e colapsos na crosta laterítica. Essas estruturas possuíram, então, importante papel no processo de enriquecimento de diversos elementos na crosta. A partir dos colapsos foram geradas grandes cavidades, por vezes preenchidas por água, dando origem ao nome do local (Rossoni, 2016).

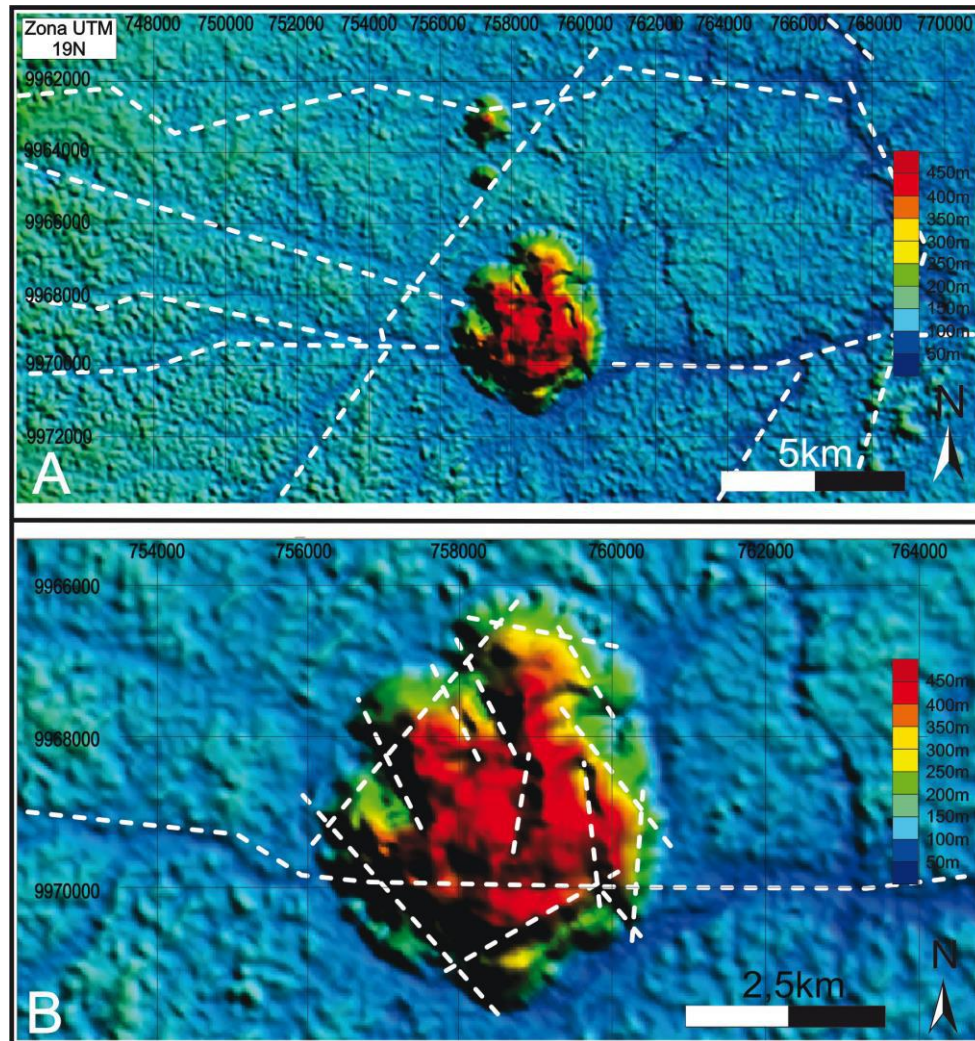


Figura 6. Elevação e principais morfoestruturas no entorno dos Morros dos Seis Lagos, Meio e Norte (A) e estruturas presentes na superfície do Morro dos Seis Lagos (B). Retirado de Rossoni (2016).

3.4.2 Mapa Geológico

No mapeamento geológico realizado na área foram descritos, além da crosta laterítica predominante em toda a superfície do Morro dos Seis Lagos, um depósito de tálus localizado após as escarpas que delimitam o contorno do Morro, e diversas depressões e lagos, preenchidos por sedimentos argilosos carbonosos (Viegas Filho & Bonow, 1976), como pode ser observado na Figura 7. Durante o Projeto Seis Lagos (Viegas Filho & Bonow, 1976) também foram descritos blocos de minério de manganês nas encostas do morro, no depósito de Tálus, além de brechas de falha localizadas na superfície da estrutura.

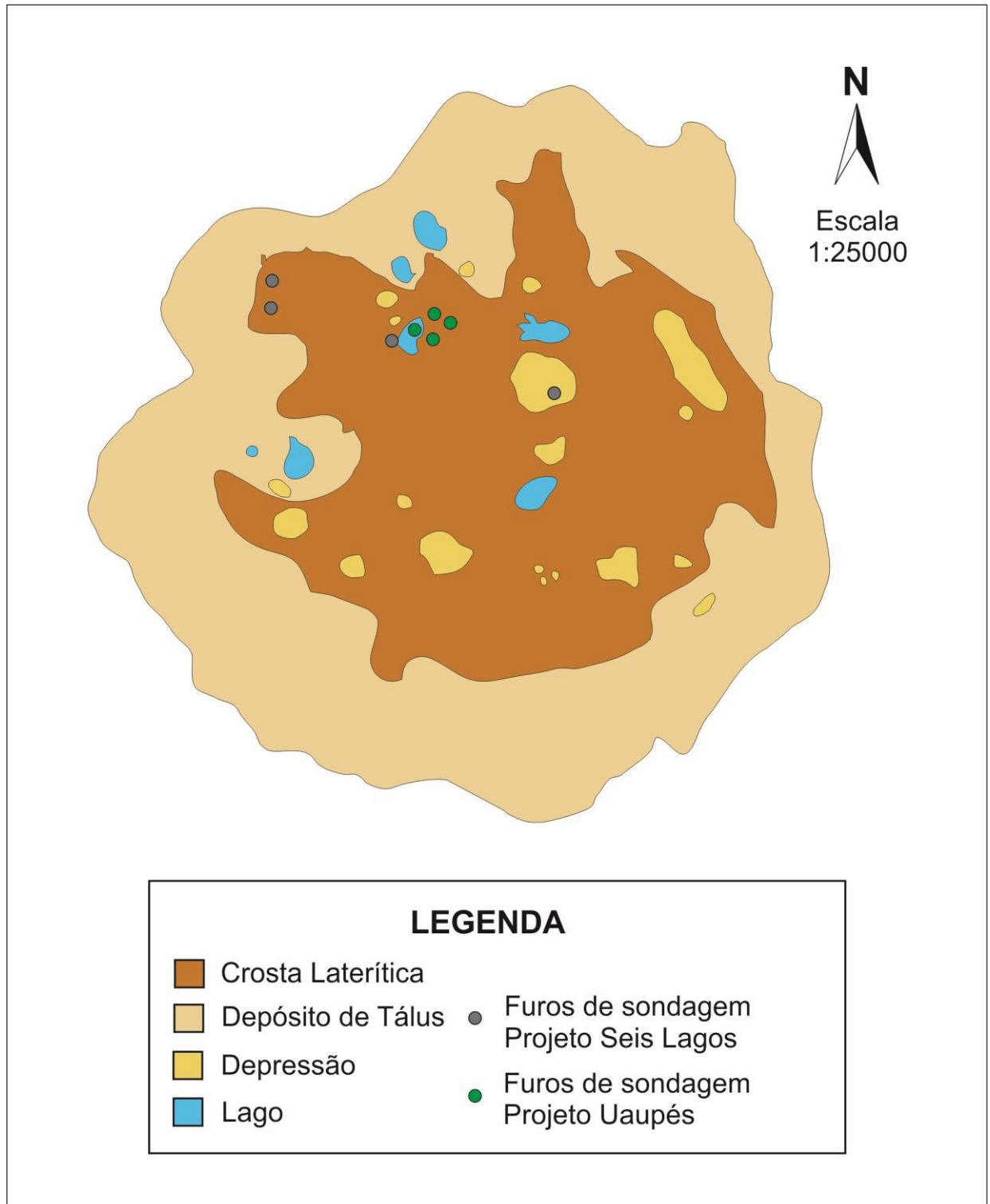


Figura 7. Mapa geológico modificado de Viegas Filho & Bonow (1976).

3.4.3 Litologias

A principal litologia aflorante na área é uma espessa crosta laterítica (255 m desta litologia foram perfurados no furo 1-SG-01-AM) porosa e com aspecto brechoidal cimentada

por óxidos de ferro e formada por concentração residual (Viegas Filho & Bonow, 1976). No Projeto Uaupés (1983), concluiu-se que o conteúdo de ferro presente nessa crosta estava originalmente na rocha carbonatítica intrusiva, o que foi corroborado por Giovannini (2017) ao classificar a rocha intrusiva como um siderita-carbonatito.

1. Siderita-carbonatito: De acordo com Giovannini (2017), esta litologia, interpretada como a intrusão que originou o Morro dos Seis Lagos e sua cobertura laterítica, foi interceptada nos furos 1-SG-02-AM e 1-SG-04-AM realizados pelo Projeto Seis Lagos. Trata-se de uma rocha de cor cinza claro, altamente friável e de aspecto brechoidal. Os principais minerais que compõem essa rocha são Siderita, Barita, Gorceixita e em menor proporção, Monazita e Pirocloro. No furo 1-SG-04-AM esta litologia ocorre abaixo de um pacote sedimentar de 233 metros de espessura, sendo que abaixo de 400 metros ela se encontra praticamente inalterada.

2. Crosta laterítica: Giovannini (2017) realizou um estudo detalhado das litologias presentes na área, com enfoque principalmente para a crosta laterítica. Através de descrições petrográficas e mineralógicas no furo 1-SG-01-AM em amostras coletadas entre 0 e aproximadamente 100 metros de profundidade, o autor identificou 6 diferentes tipos de crosta (Figura 8), em ordem de profundidade: laterita pisolítica; laterita fragmentada; laterita mosqueada; laterita roxa; laterita manganesífera; laterita marrom. Observando os testemunhos de sondagem dos demais furos, o autor constatou que os tipos de crosta laterítica são muito semelhantes, priorizando então as coletadas no furo 1-SG-01-AM. Estas litologias serão descritas detalhadamente a seguir. Quanto à mineralogia, o autor define que a crosta é composta basicamente por Goethita (mais presente nas porções superior e inferior do furo) e Hematita (mais presente na porção intermediária do furo). O principal mineral de minério para nióbio descrito é um Nb-

Rutilo (11,26 a 22,23% de peso em Nb_2O_5), que ocorre ao longo de todo o perfil de crosta laterítica, interpretado como originado a partir de pirocloro.

- **Laterita Pisolítica:** Ocorre na superfície, no intervalo entre 0m e 2,20m. Predominância de estrutura pisolítica alternando com bandas maciças ferruginosas variando entre marrom escuro, laranja e vermelho. Composta 80% por Goethita e 20% por Hematita.
- **Laterita Fragmentada:** Ocorre em dois intervalos separados entre si pela laterita mosqueada, sendo composta por fragmentos ferruginosos sub-arredondados, que são circundados por material mais poroso. Esta fragmentação pode ter sido gerada por colapsos ocorridos próximos à superfície, onde processos de dissolução atuam com mais intensidade. Goethita é o mineral dominante, mas a Hematita aparece mais marcante se comparado com a laterita pisolítica que se encontra por cima. Nb-rutilos ocorrem na forma de pequenos grãos de cor verde zonados e fraturados, envoltos por bandas ferruginosas. Brookita ocorre na forma de esférulas quebradas, e Florencita rica em Cério ocorre raramente.
- **Laterita Mosqueada:** Descrita no intervalo entre 9 metros e 17 metros de profundidade. Ocorre sob a forma de bandas verticais alternando entre bandas escuras hematíticas e bandas vermelho claro de composição majoritariamente por Goethita. A estrutura mosqueada é interpretada como resultado da penetração de raízes de plantas no material laterítico anterior ao endurecimento do mesmo. Nestas três lateritas superiores até então descritas, assumiu-se que ocorreu um maior retrabalhamento da rocha que gerou a Goethita.
- **Laterita Roxa:** Dividida em duas porções: superior e inferior. A porção superior, descrita entre 19,75 metros e 31,00 metros de profundidade é mais

porosa do que na porção inferior. Tipicamente mais hematítica do que as lateritas superiores, onde a Hematita ocorre como nódulos de 2 cm enquanto a Goethita ocorre como cristais fibrosos radiais. Nessa litologia é observada uma maior presença de esférulas de Nb-Brookita se comparado com as demais porções da crosta laterítica.

- **Laterita Manganesífera:** Encontrada entre 31 metros e 40 metros de profundidade. Óxidos de manganês (Hollandita com Cerianita associada) ocorrem como veios ou massas irregulares cortando o material ferruginoso, sendo a Siderita do carbonatito a fonte para o Manganês. Estes veios são interpretados como frutos de evento tardio, tendo sido precipitado por solução com maior poder de oxidação do que as soluções que precipitam Ferro, mais próximo à coluna d'água. Sua composição varia de 20 a 45% de Hematita, 30 a 68% de Goethita, 12% de Hollandita e 1% de Cerianita, sendo essa a 2ª subdivisão da crosta que mais apresenta Hematita.
- **Laterita Marrom:** Nessa subdivisão da crosta laterítica ocorreu baixa recuperação. A estrutura encontrada é mais homogênea, com Goethita dominante (96%). Foi considerada como uma laterita mais próxima do protólito, e portanto menos desenvolvida. O Nb-rutilo ocorre em grãos isolados, semelhante ao descrito nas lateritas superiores. Nesta subdivisão da crosta laterítica ocorrem também minerais de Pirocloro.

Gnaiss, Cataclasito, Microgranito e Granodiorito foram descritos nos furos de sondagem e interpretados como sendo parte das encaixantes.

No interior de depressões e nas amostras da sondagem realizada no Lago Esperança (Furo 1-SG-04-AM), foram descritos sedimentos argilosos carbosos, ritmitos e brechas.

Datações através de pólen indicaram idade Neógena para os mais antigos destes sedimentos de bacia interior, o que pode significar que foi nessa época que a erosão atingiu a rocha intrusiva iniciando o processo de dissolução do carbonatito.

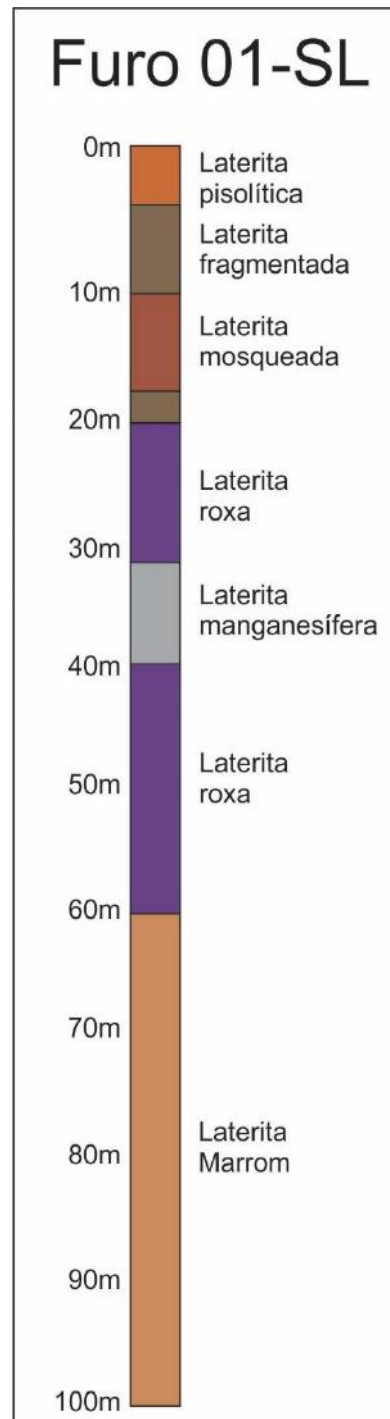


Figura 8. Perfil da crosta laterítica amostrada no furo 1-SG-01 do Projeto Seis Lagos. Modificado de Giovannini (2017).

3.4.4 Mineralogia

Os minerais descritos por Giovannini (2017) são principalmente Siderita, Barita, Gorceixita, Monazita e Pirocloro no siderita-carbonatito. No perfil de crosta laterítica, são descritos óxidos de Ferro (Hematita e Goethita), óxidos de Manganês (Hollandita com Cerianita associada) e os minerais de nióbio (Nb-rutilo, Nb-brookita e pirocloro rico em cério). Estes minerais são mostrados na Figura 9.

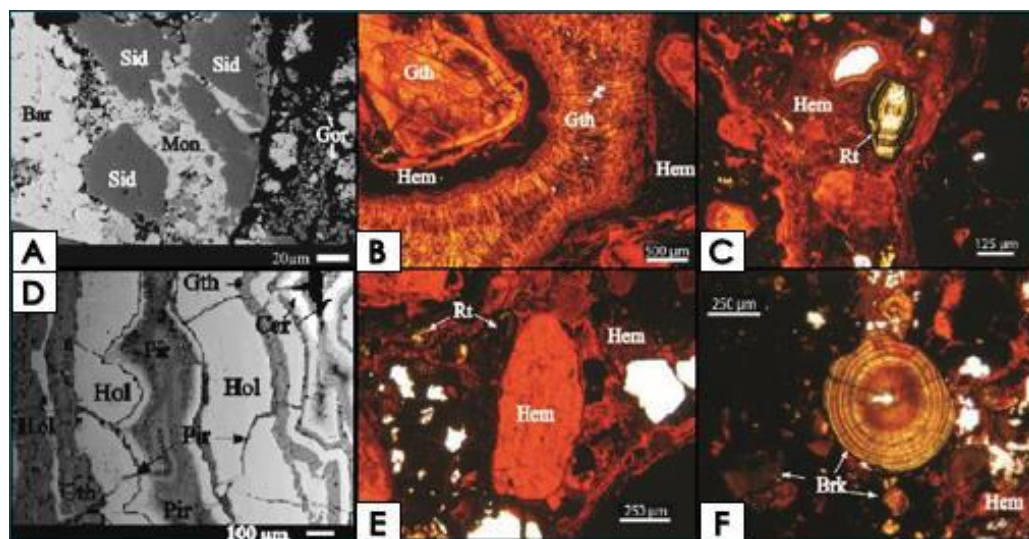


Figura 9. Feições microscópicas dos minerais presentes no Morro dos Seis Lagos. (A) Cristais de Monazita com zonas ricas em Monazita envoltos por matriz rica em Gorceixita, cortados por um veio de Barita (Siderita-Carbonatito no furo 1-SG-02-AM). (B) Goethita maciça envolta por banda hematítica e Goethita fibrosa (Laterita Fragmentada). (C) Cristal de Nb-Rutilo zonado (Laterita Fragmentada). (D) Hollandita, Cerianita e Pirolusita (Laterita Manganesífera). (E) Fragmento subarredondado de Hematita envolto por massas hematíticas e Nb-Rutilo. (Laterita Fragmentada). (F) Esférula de Brookita apresentando anéis de Liesegang (Laterita Roxa). Retirado de Giovannini (2017)

3.4.4.1 Minerais de minério de Nióbio

Os minerais descritos por Giovannini (2017) como os que compõem o minério de nióbio são principalmente um Nb-rutilo e uma Nb-brookita, e mais raramente ocorre a columbita. Estes estudos sugerem que o Nb e o Fe substituíram o titânio na estrutura do rutilo: $[\text{Fe}^{3+} + \text{Nb por } 2\text{Ti}]$.

O Nb-rutilo ocorre disseminado em todo o perfil laterítico, e possui a seguinte composição química: TiO_2 (57,84% a 80,92%), Nb_2O_5 (11,26% a 22,23%), Fe_2O_3 (8,96 a 14,95%), 0% a 1,27% de WO_3 , e 0% a 1,09% de SiO_2 .

A Nb-brookita também ocorre disseminada em todo o perfil laterítico em pequenas quantidades, exceto na laterita roxa, onde ocorre na forma de esférulas, enquanto o Nb-rutilo é raro nesse tipo de crosta. A composição química é: TiO_2 (68,23% a 82,99%), Nb_2O_5 (10,43% a 16,45%), Fe_2O_3 (7,65% a 13,87%), 0% a 1,2% de WO_3 , e 0% a 0,97% de SiO_2 . As esférulas de Nb-brookita exibem estruturas similares a anéis de Liesegang, formadas quando a difusão ocasiona supersaturação e nucleação.

Estes minerais são formados a partir de intensa lateritização. Mitchell (2015) afirma que este processo leva a inteira decomposição de pirocloro, formando Nb-rutilo e Brookita, o que explica a presença de pirocloro apenas na faixa descrita como laterita marrom, uma vez que essa é mais profunda e sofreu menos intensamente o processo de lateritização.

3.4.6 Modelo de evolução

Justo (1983) propôs um modelo de evolução para a área do Morro dos Seis Lagos (Figura 10), descrito a seguir:

1. Primeiramente, ocorre a intrusão de magma alcalino-carbonatítico cortando as rochas do Complexo Cauaburi e da Formação Roraima;
2. Após constante erosão a rocha carbonatítica ficou exposta, e devido a ação do intemperismo químico se iniciou um processo de carstificação do relevo;
3. Processo contínuo de compactação através de dissoluções que formaram cavernas e constantes desmoronamentos gerando brechas, que posteriormente foram cimentadas com hidróxidos de ferro dando origem à crosta laterítica;

4. A crosta laterítica sustentou então o relevo do que veio a se moldar o Morro dos Seis Lagos, enquanto ao seu redor, os arenitos da Formação Roraima foram mais facilmente erodidos;
5. Situação atual, onde não há mais registros da Formação Roraima in situ, havendo apenas ocorrência de blocos de metarenito e extensa cobertura arenosa atribuídos à mesma na região ao redor da área de estudo. Enquanto que o Morro dos Seis Lagos se sobressai no relevo plano local.

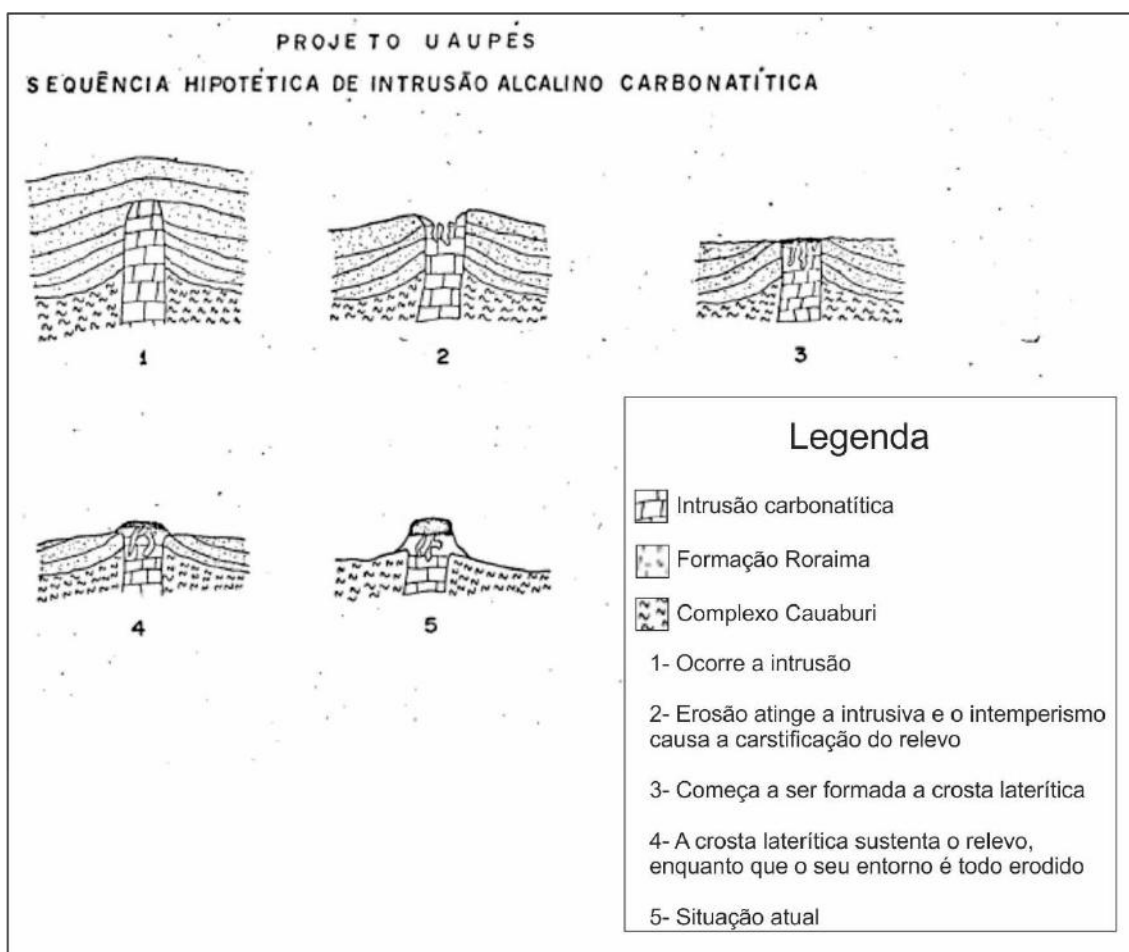


Figura 10. Modelo de evolução geológica do Morro dos Seis Lagos. Modificado de Justo (1983).

4 HISTÓRICO DE EXPLORAÇÃO

4.1 Projeto RADAM

Durante o mapeamento geológico ao milionésimo realizado pelo Projeto RADAM no início dos anos 70, foram identificadas três estruturas circulares na região da bacia do rio Cauaburi, na área da Folha NA.19-Içana, denominadas Morro do Meio, Morro do Norte e a maior delas, Morro dos Seis Lagos. Essas estruturas revelaram anomalias radiométricas de até 15000 cintilações por segundo, além de ocorrências de ferro (Fe) e manganês (Mn), o que culminou na seleção da área como alvo de maior interesse para um posterior estudo detalhado.

4.2 Projeto Seis Lagos

Em abril de 1975, o Projeto RADAM encaminhou a sugestão ao DNPM, que então elaborou um programa de pesquisa na área, denominado Projeto Seis Lagos (Viegas Filho & Bonow, 1976). O projeto teve como objetivo comprovar o potencial econômico das estruturas encontradas pelo Projeto RADAM. A execução deste ficou a cargo da Superintendência Regional de Manaus, da CPRM, que iniciou os trabalhos de campo entre maio e dezembro de 1975. Neste projeto, o Morro dos Seis Lagos foi escolhido como principal alvo da pesquisa em comparação ao Morro do Meio e Morro do Norte, devido às maiores anomalias radiométricas e ocorrências de ferro e manganês em superfície.

Na etapa de trabalho de campo, foi feito mapeamento geológico na escala 1:25000 de uma área de 19 km², levantamento topográfico e cintilométrico, malha geoquímica, além de execução de 1089,10 metros de sondagem com testemunhagem contínua, distribuídos em 4 furos. Os furos foram realizados sondas BBS-10 (Furo 1) e BBS-17-A (demais furos). A

recuperação média de testemunhos para esses 4 furos de sondagem foi de apenas 38%, o que foi atribuído à presença de fendas e cavernas cortadas pelos furos.

- **Furo 1-SG-01-AM:** De profundidade de 255,25 m, alcançou a cota de 10m. Perfurou somente crosta laterítica. Foi o furo em que se obteve a maior espessura da crosta, não tendo alcançado o carbonatito subjacente.

Na segunda etapa deste projeto, foram realizadas análises químicas das amostras coletadas, confecção e descrição de lâminas delgadas e a interpretação de todos os dados obtidos. A principal litologia descrita foi uma crosta laterítica ferruginosa com profundidades de no mínimo 255 metros (Furo 1-SG-01-AM), localizada sobre uma rocha de natureza carbonatítica (Furo 1-SG-04-AM). A rocha encaixante para a intrusão carbonatítica foi descrita como as granítico-gnáissicas pré-cambrianas da região do Alto Rio Negro (Pinheiro *et al.*, 1976).

Este projeto indicou possibilidade econômica para diferentes elementos, sendo eles: Fe, Mn, Nb, ETR, Ba, Sc, Th, V, Zn. O resultado final foi publicado em 1976 pela CPRM em dois volumes.

4.3 Projeto Uaupés

O Projeto Uaupés (Justo, 1983) teve seus alvarás 2702/81 e 2844/81 inicialmente para pesquisa de nióbio (Nb), e, posteriormente, em face aos resultados obtidos, foi solicitada sua averbação. O objetivo deste projeto foi quantificar os recursos minerais de Nb descritos pelo Projeto Seis Lagos.

A cargo da Superintendência Regional de Manaus da CPRM, o projeto contou com adensamento da malha geoquímica na porção noroeste da estrutura (50 x 125m) e trabalho de

topografia no Morro dos Seis Lagos e nos outros alvos, sendo eles Morro do Meio e Morro do Norte.

Foram realizados levantamentos aeromagnético e radiométrico em uma área de 100 km², e 4 novos furos de sondagem utilizando sonda BBS-10, previstos para terminarem na mesma cota de 197m, formando entre si um retângulo de 125m x 150m. As profundidades dos furos 1 ao 4 deste projeto foram respectivamente 80, 85, 98 e 112 metros. Estes foram alocados com intuito de realizar um cálculo de cubagem para recursos de Nb, e os resultados obtidos são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Cálculo de cubagem para recursos de Nb no Projeto Uaupés.

| Categoria de reservas | Minério (ton.) | Teor médio Nb₂O₅ | Nb₂O₅ contido (ton.) |
|------------------------------|-----------------------|---|---|
| Medida | 38.376.000 | 2,85 | 1.093.716 |
| Indicada | 200.640.000 | 2,40 | 4.815.360 |
| Inferida | 2.658.892.800 | 2,84 | 75.512.555 |
| Total | 2.897.908.800 | 2,81 | 81.431.237 |

Amostras analisadas por Difração de Raios-X (DRX) permitiram concluir neste relatório que o nióbio se encontra na estrutura do rutilo niobífero e da brookita, onde aparentemente substitui o titânio na estrutura desses minerais.

Os resultados desta etapa foram publicados em 1983 em dois volumes, e a tonelagem de minério de Nióbio calculada na área a classifica como o maior depósito do mundo deste elemento.

Uma visão do posicionamento espacial da malha geoquímica e dos furos de ambos os projetos aqui descritos é mostrada na Figura 11.

4.4 Projeto Terras Raras

A partir de 2012 os estudos na área foram retomados pela CPRM, direcionados para Elementos Terras Raras (ETR). Foram realizadas redescrição, reamostragem e reanálise das amostras coletadas durante os projetos Seis Lagos e Uaupés. Estes dados de reanálise são os utilizados no presente trabalho para o cálculo dos recursos.

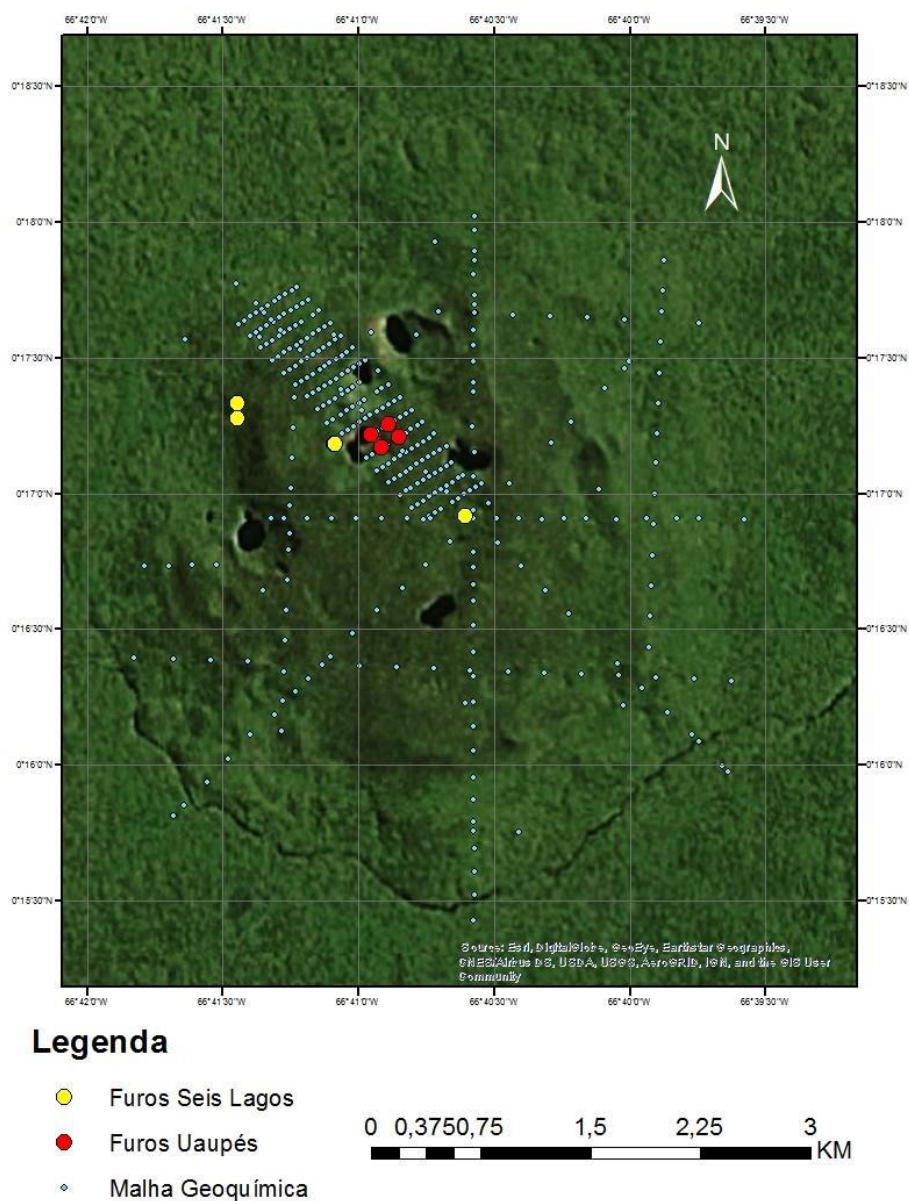


Figura 11. Posicionamento da malha geoquímica de solo e furos de sondagem realizados durante os projetos Seis Lagos e Uaupés. Imagem retirada do software ArcGIS da ESRI, utilizando o mapa base do mesmo como fundo, representando a feição morfológica do Morro dos Seis Lagos.

4.5 Restrições da Exploração

O Morro dos Seis Lagos possui consideráveis empecilhos que impedem a perspectiva de exploração mineral na área em um futuro próximo. No entanto, vale ressaltar a importância de conhecer e mensurar os depósitos presentes em território nacional, uma vez que avanços na tecnologia de beneficiamento do minério ou alterações na legislação podem torná-los economicamente viáveis.

Os principais aspectos restritivos até então identificados são:

1. Necessidade de maiores estudos metalúrgicos para beneficiamento do minério;
2. Localização a menos de 150 quilômetros da fronteira com a Venezuela;
3. Localização em unidades de conservação biológicas e terras indígenas.

Viegas Filho & Bonow (1976) afirmam no relatório final do Projeto Seis Lagos que o minério presente na área precisaria de estudos mais aprofundados para a concentração dos elementos desejáveis, principalmente por uma restrição do mesmo a alto forno.

A lei 6.634/1979 apresenta algumas restrições de atividades nas áreas localizadas a menos de 150 quilômetros das fronteiras do Brasil, dentre elas, a mineração. É restrita pesquisa, lavra, exploração e aproveitamento de recursos minerais, salvo aqueles de imediata aplicação na construção civil, assim classificados no Código de Mineração, apenas para as empresas que apresentarem pelo menos 51% de capital nacional, pelo menos 2/3 de trabalhadores brasileiros e administração ou gerência majorita por brasileiros, assegurados a estes os poderes predominantes.

O depósito do Morro dos Seis Lagos está localizado por unidades de conservação biológicas e indígenas, como mostrado na Figura 12:

1. Parque Nacional do Pico da Neblina (Decreto Executivo nº 83550 de 05/06/1979);

2. Reserva Biológica Estadual do Morro dos Seis Lagos (Decreto nº 12.836 de 09/03/1990 publicado no Diário Oficial da União no dia 09/03/1990);
3. Terra Indígena Balaio (Decreto nº 21 de 21/12/2009, publicado no Diário Oficial da União de 22/12/2009).

Nota-se que todas estas reservas foram criadas após o descobrimento do depósito do Morro dos Seis Lagos.

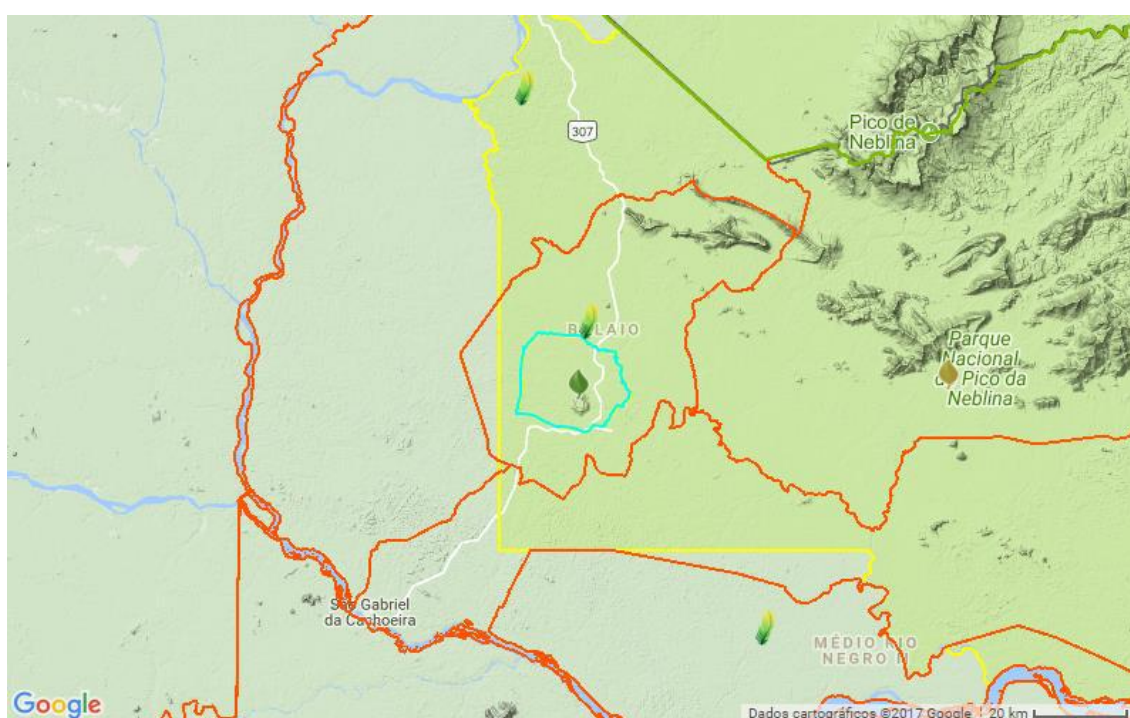


Figura 12. Em azul, Reserva Biológica Estadual Morro dos Seis Lagos; em vermelho, terras indígenas; em amarelo, Parque Nacional do Pico da Neblina. Disponível: <<https://uc.socioambiental.org/uc/4738>>. Acesso em 27/12/2017.

Um outro aspecto, talvez não restritivo mas certamente a ser considerado em um possível prosseguimento na exploração da área é a baixa recuperação de amostras nos testemunhos de sondagem, na casa de 38%. O principal fator atribuído a esse fato é a presença de cavidades no interior da crosta laterítica, mas também pode representar má qualidade no processo de sondagem. Esta baixa recuperação não foi considerada para os cálculos realizados pela CPRM no Projeto Uaupés.

5 METODOLOGIA

O primeiro passo para elaboração do presente trabalho foi uma extensa pesquisa bibliográfica dos relatórios publicados pela CPRM e demais pesquisadores sobre a área do Morro dos Seis Lagos. Neles foi possível reunir informações sobre as etapas de exploração na área, além de dados atualizados sobre a geologia.

5.1 Base de Dados

O segundo passo foi a elaboração de uma base de informações no software Microsoft Excel a partir de três séries distintas de dados. A amostragem na área do Morro dos Seis Lagos foi realizada pela CPRM em duas etapas: 1976 pelo Projeto Seis Lagos e 1983 pelo Projeto Uaupés, e passaram por análise química pelo LAMIN da CPRM. Ao longo do Projeto Terras Raras, as amostras dos furos e malhas coletadas pelos dois projetos antigos foram reanalisadas utilizando a mesma alíquota, exceto no furo 1 do Projeto Seis Lagos, onde foi feita reamostragem. Essas alíquotas e novas amostras foram lidas pelo laboratório SGS Geosol, que gerou os boletins analíticos usados para o presente trabalho.

5.2 Comparação de dados

Nesta etapa foi realizada uma comparação entre os dados obtidos de Nb pelos laboratórios LAMIN da CPRM (Projetos Uaupés e Seis Lagos) e SGS Geosol (Projeto Terras Raras) analisados por fluorescência de raio-x para as mesmas alíquotas das amostras, coletadas durante os projetos Seis Lagos e Uaupés.

5.3 Controle de qualidade analítica (QAQC)

Foi realizado um controle de qualidade analítica dos dados aplicando diferentes ferramentas. Primeiramente foi aplicado o modelo estatístico “*Reduced Major Axis (RMA)*” proposto por Sinclair & Bentzen (1998), onde foi possível obter o erro analítico do levantamento, e a partir disso, calcular a precisão do mesmo. Em seguida, os dados analíticos obtidos como procedimento de rotina pelo laboratório para amostras padrão de teor conhecido foram plotados com intuito de observar se os valores obtidos ficaram dentro de intervalos de erro aceitáveis.

5.4 Cálculo de cubagem

A partir dos dados analíticos de teor de Nb_2O_5 em amostras dos testemunhos de sondagem coletadas a partir de 5 furos de sondagem rotativa, sendo 1 do Projeto Seis Lagos e 4 do projeto Uaupés, foi possível realizar um cálculo de cubagem do minério de Nb na área por meio do software Microsoft Excel utilizando parâmetros equivalentes ao cálculo outrora realizado no Projeto Uaupés, mas utilizando dados laboratoriais mais precisos.

5.5 Curva de Parametrização Teor x Tonelagem

Nesta etapa, também utilizando o Microsoft Excel, foi elaborado um gráfico mostrando as características de teor e tonelagem do depósito para diferentes cenários possíveis de teor de corte para uma possível lavra na área.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Durante os anos de 2012 e 2013, o Projeto Terras Raras da CPRM retomou os estudos na área do Morro dos Seis Lagos. Nesta etapa foi realizada redescrição de testemunhos, além de reamostragem e reanálise de alíquotas da malha geoquímica e furos de sondagem realizados ao longo dos Projetos Seis Lagos (1976) e Uaupés (1983). As análises geoquímicas foram realizadas pelo Laboratório SGS Geosol por uma combinação de métodos analíticos, incluindo FRX e ICP-MS/EOS, seguindo a lógica de analisar para FRX apenas as amostras cujo teor supera o limite superior de detecção dos métodos ICP-MS/EOS. A partir desses novos dados foi possível realizar um novo cálculo para os recursos de nióbio da área, obedecendo os passos a seguir descritos.

6.1 Comparação de dados

A primeira etapa para a análise de dados foi realizar uma comparação dos dados obtidos pelo Laboratório LAMIN/CPRM, no Projeto Uaupés, com os obtidos pelo Laboratório SGS Geosol, no Projeto Terras Raras. Esta comparação foi realizada a partir de 149 amostras analisadas na mesma polpa analítica para Nb por Fluorescência de Raios-x (FRX) em ambos os projetos.

A ferramenta utilizada para a comparação foi o modelo estatístico da reta “*Reduced Major Axis*” (RMA) proposto por Sinclair & Bentzen (1998), como mostra a Figura 13. Este modelo consiste na obtenção de parâmetros para o cálculo da equação da reta que melhor se ajusta a duas séries de dados.

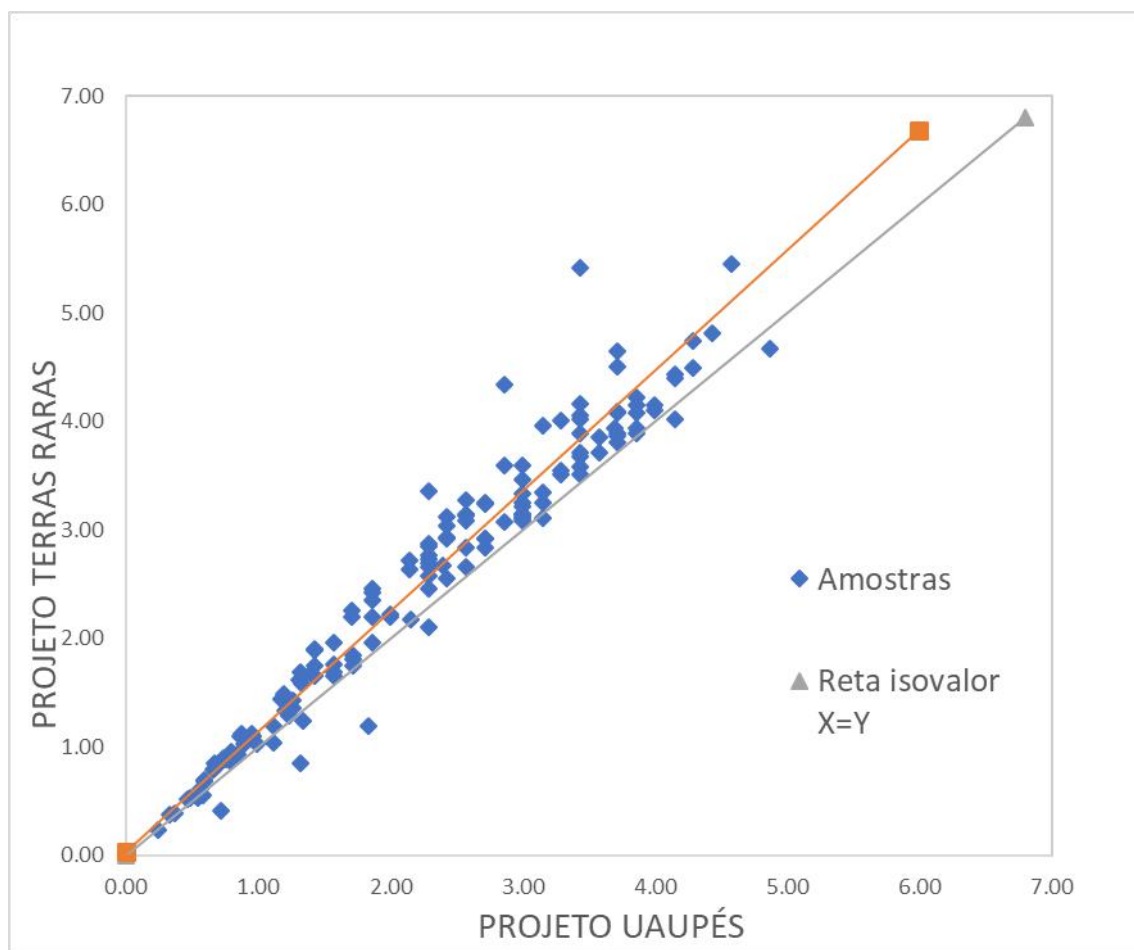


Figura 13. Reta RMA comparando os dados obtidos pelo Projeto Uaupés (Eixo X) com o Projeto Terras Raras (Eixo Y), ambos da CPRM. A comparação foi realizada para teores lidos na mesma amostra.

Os parâmetros obtidos são mostrados no Quadro 1 a seguir.

Quadro 1. Parâmetros obtidos pela reta RMA da Figura 8.

| | |
|--|---------------|
| Coefficiente angular (B1) | 1,1072 |
| Coefficiente linear (B0) | 0,034 |
| Erro (e) | 0,396 |
| Erro embutido ao coeficiente angular (e_{B1}) | 0,021 |
| Erro embutido ao coeficiente linear (e_{B0}) | 0,053 |

A equação da reta RMA obtida foi $Y = 1,1072x + 0,034$, com erro embutido para o coeficiente angular igual a 0,021. Para as duas populações de dados serem consideradas estatisticamente diferentes entre si, o valor do coeficiente angular \pm o erro precisa ser diferente de 1, o que deixaria a reta RMA com a mesma inclinação da reta de isoteores ($X=Y$) mostrada no gráfico. No caso da comparação entre os projetos Uaupés e Terras Raras, foi então possível concluir que essa diferença entre os dados é verdadeira, uma vez que $1,1072 \pm 0,021 \neq 1$. Além disso, também foi possível observar que os dados obtidos no Projeto Terras Raras possuem um viés rotacional de aumento no teor obtido para cada amostra. Esse aumento é de 10,72% no geral, considerando tanto as amostras da malha geoquímica quanto de testemunhos de sondagem.

Em algumas amostras do levantamento geoquímico do Projeto Terras Raras, o valor lido de Nb_2O_5 foi superior ao limite superior de detecção do método de análise por Fluorescência de Raios-x (FRX). 19 dessas amostras, sendo 18 de malha geoquímica de superfície e uma no furo 1 realizado pelo Projeto Seis Lagos, foram analisadas durante o Projeto Uaupés (1983) e tiveram valor reportado. O teor das mesmas foi então multiplicado pela equação da reta RMA ($Y = 1,1072x + 0,034$) que relaciona ambos os levantamentos,

| Amostra | Categoria | Valor Projeto Uaupés | Valor corrigido Projeto Terras Raras |
|--|------------------|----------------------|--------------------------------------|
| MS-R-010 | Malha geoquímica | 5,01 | 5,58 |
| Tabela 2. Comparação entre valores obtidos no Projeto Uaupés e valores corrigidos pela equação da reta RMA. | | | |
| MS-R-037 | Malha "solo" | 5,43 | 6,05 |
| MS-R-043 | Malha "solo" | 8,44 | 9,38 |
| MS-R-045 | Malha "solo" | 6,01 | 6,69 |
| MS-R-048 | Malha "solo" | 5,86 | 6,52 |
| MS-R-060 | Malha "solo" | 8,30 | 9,22 |
| MS-R-061 | Malha "solo" | 7,29 | 8,11 |
| MS-R-062F | Malha "solo" | 5,00 | 5,57 |
| MS-R-062J | Malha "solo" | 6,87 | 7,64 |
| MS-R-062M | Malha "solo" | 5,58 | 6,21 |
| MS-R-071 | Malha "solo" | 5,87 | 6,53 |
| MS-R-074 | Malha "solo" | 6,29 | 7,00 |
| MS-R-105 | Malha "solo" | 5,86 | 6,52 |
| MS-R-110 | Malha "solo" | 3,15 | 3,52 |
| MS-R-113 | Malha "solo" | 5,43 | 6,05 |
| MS-R-206 | Malha "solo" | 5,58 | 6,21 |
| MS-R-353 | Furo 1-SG-01-AM | 10,59 | 11,76 |

6.2 Controle de qualidade analítica (QAQC)

6.2.1 Comparação dos dados dos projetos Uaupés e Terras Raras a partir da reta RMA

Na segunda etapa da análise dos dados analíticos foram utilizadas técnicas para o controle de qualidade das mesmas. Em um primeiro momento, visando o cálculo da precisão de cada um dos levantamentos geoquímicos (Projeto Uaupés e Projeto Terras Raras), foram realizadas etapas de cálculos para obter os parâmetros usados na fórmula da precisão.

A equação do erro (e) proposta por Sinclair & Bentzen (1998) relaciona o mesmo com as variâncias (s^2) dos dados plotados nos eixos X e Y segundo a seguinte fórmula (i):

$$e^2 = s_x^2 + s_y^2$$

No caso da comparação entre os dados obtidos pelos dois projetos, o erro (0,396) é uma variável obtida a partir da reta RMA. Para o cálculo das variâncias de cada um dos levantamentos, é necessário realizar uma nova reta RMA (Figura 14) comparando os teores aferidos da amostra e de sua respectiva duplicata analítica pelo laboratório. No Projeto Uaupés não foram fornecidos resultados de duplicatas, e portanto a reta foi feita para os dados obtidos pelo Laboratório SGS Geosol no Projeto terras Raras a partir de 16 pares de amostras/duplicatas.

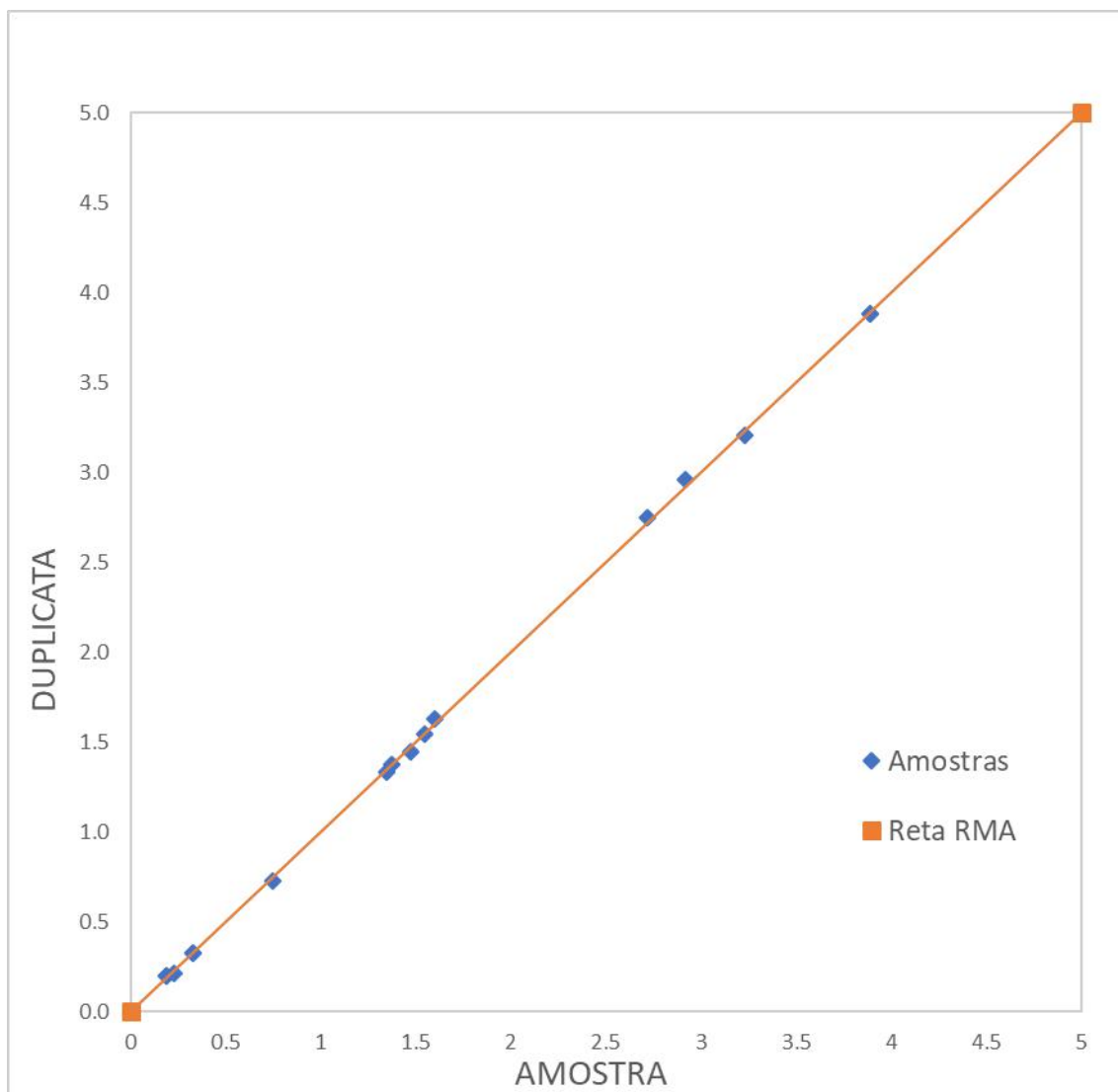


Figura 14. Reta RMA comparando teores de Nb₂O₅ (%) lidos em pares de amostras e duplicatas pelo laboratório SGS Geosol para o Projeto Terras Raras.

Os parâmetros obtidos são mostrados no Quadro 2 a seguir.

Quadro 2. Parâmetros da reta RMA.

| | |
|--|----------------|
| Coefficiente angular (B1) | 0,99917 |
| Coefficiente linear (B0) | 0,001 |
| Erro (e) | 0,030 |
| Erro embutido ao coeficiente angular (e_{B1}) | 0,004 |
| Erro embutido ao coeficiente linear (e_{B0}) | 0,008 |

Com o valor do erro (e) obtido (0,030), é possível desenvolver a fórmula (i) visando obter a variância referente ao levantamento laboratorial realizado no Projeto Terras Raras. Considerando que ambas as séries de dados foram obtidas pelo mesmo levantamento do mesmo laboratório, as variâncias dos dados plotados nos eixos X (amostra) e Y (duplicata) são iguais, e a soma das mesmas é então a variância total referente ao levantamento do Projeto Terras Raras.

$$e^2 = s^2_{\text{DUPLICATAS}} + s^2_{\text{AMOSTRAS}}$$

$$e^2 = 2 * s^2_{\text{PROJETO TERRAS RARAS}}$$

$$(0,030)^2 / 2 = s^2_{\text{PROJETO TERRAS RARAS}}$$

$$s^2_{\text{PROJETO TERRAS RARAS}} = 0,00045$$

Onde:

e = erro

$s^2_{\text{DUPLICATAS}}$ = Variância da série de teores das duplicatas

s^2_{AMOSTRAS} = Variância da série de teores das amostras

$s^2_{\text{PROJETO TERRAS RARAS}}$ = Variância total referente ao levantamento do Projeto Terras Raras

Na atual situação já se conhece então a variância do Projeto Terras Raras, restando somente a do Projeto Uaupés para o cálculo da precisão. Assim, novamente foi desenvolvida a fórmula (i), onde uma vez que se conhece o erro (0,396) da reta RMA comparando os dois projetos e a variância referente ao Projeto Terras Raras (0,00045), pode-se obter a variância referente ao Projeto Uaupés.

$$e^2 = s^2_{\text{TERRAS RARAS}} + s^2_{\text{UAUPÉS}}$$

$$(0,396)^2 = 0,00045 + s^2_{\text{UAUPÉS}}$$

$$s^2_{\text{UAUPÉS}} = 0,156366$$

6.2.2 Cálculo da precisão analítica dos levantamentos geoquímicos

Thompson e Howarth (1978) propuseram uma equação para o cálculo da precisão analítica que relaciona o desvio padrão de uma série de dados com a concentração, mostrada na fórmula (ii) a seguir:

$$P = \frac{200 \cdot s}{C}$$

Onde:

P = precisão analítica em porcentagem (%)

s = desvio padrão

c = concentração

O desvio padrão é igual à raiz quadrada da variância, atributo já calculado para os dados laboratoriais dos projetos Uaupés e Terras Raras. Utilizando o valor médio de concentração de Nb₂O₅ (%) de cada um dos projetos, é possível calcular a precisão analítica referente a cada um (Tabela 3).

Tabela 3. Precisão analítica dos levantamentos geoquímicos dos Projetos Uaupés e Terras Raras.

| Projeto | Variância (s²) | Desvio padrão (s) | Concentração média (Nb₂O₅ (%)) | Precisão (%) |
|----------------|----------------------------------|--------------------------|---|---------------------|
| Uaupés | 0,156366 | 0,3954 | 2,75 | 28,79 |
| Terras Raras | 0,00045 | 0,0212 | 1,64 | 2,58 |

Menores valores percentuais de precisão são melhores. Ao analisar as precisões obtidas para ambos os levantamentos, pode-se observar que a obtida para os dados do levantamento geoquímico do Projeto Terras Raras (2,58%) é bem melhor do que os 28,79%

obtidos para o Projeto Uaupés. Também vale ressaltar que apenas a precisão do Projeto Terras Raras se encontra abaixo de 10%, valor considerado satisfatório para a exploração mineral, segundo Ramsey *et al.* (1992).

6.2.3 Aferição da qualidade dos teores lidos em amostras-padrão

Um procedimento de rotina comum executado pelos laboratórios durante análises geoquímicas é realizar periodicamente a leitura de cada elemento em amostras-padrão de teor conhecido. Os valores lidos possuem uma faixa de 95% de confiança, que consiste no valor certificado ± 2 desvios padrão, e devem se encontrar dentro da mesma para serem considerados de boa qualidade, o que aumenta a confiabilidade nos resultados obtidos pelo laboratório.

O Laboratório SGS adotou o padrão internacional “*TILL-3*”, certificado pelo “*Canadian Certified Reference Materials Project*” para as leituras pelo método laboratorial ICP-MS. Para a leitura por Fluorescência de Raios-X o padrão utilizado foi o “*GRE-03*”, certificado pelo “*Geostats PTY LTD*”.

Os valores lidos de Nb_2O_5 para os dois métodos analíticos foram plotados em gráfico com intuito de verificar se as aferições de teor estão dentro da faixa de 95% de confiança (Figuras 15 e 16).

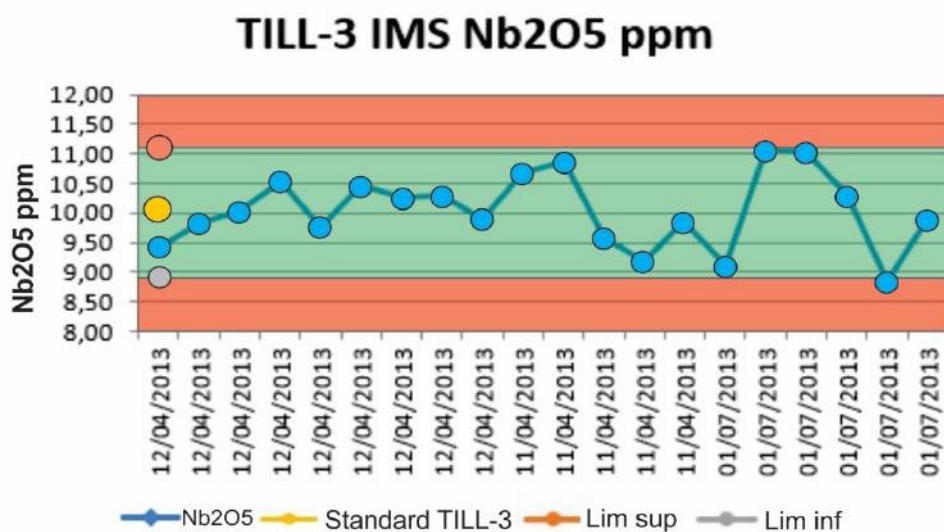


Figura 15. Em azul: leituras do padrão em diferentes datas. Em amarelo o valor certificado para a amostra. A faixa verde corresponde ao intervalo de 95% de confiança.

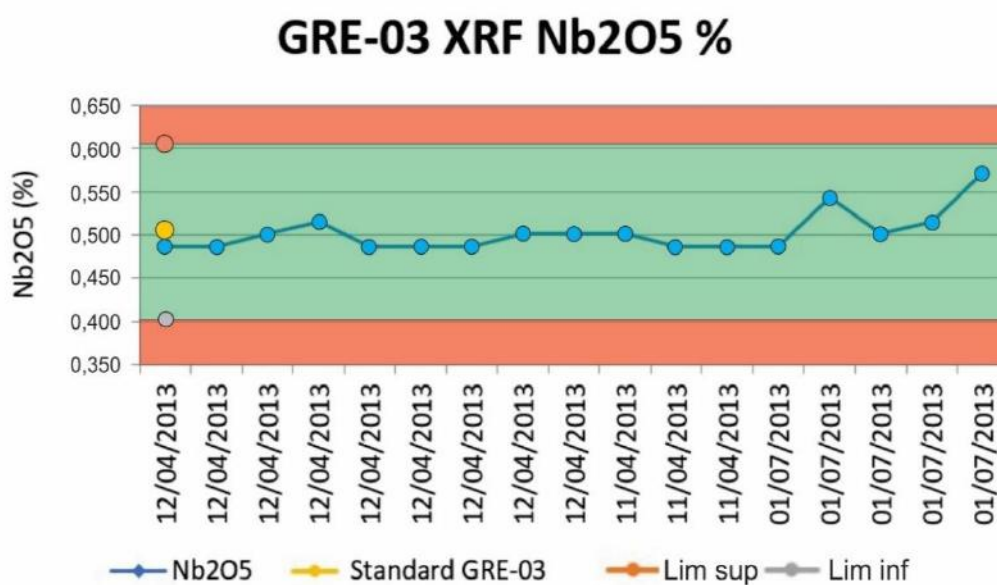


Figura 16. Em azul: leituras do padrão em diferentes datas. Em amarelo o valor certificado para a amostra. A faixa verde corresponde ao intervalo de 95% de confiança.

De acordo com os gráficos, é possível observar que a grande maioria das amostras esteve dentro da faixa de 95% de confiança, mostrando grande qualidade dos dados gerados pelo laboratório SGS Geosol.

Considerando que os resultados analíticos obtidos no Projeto Terras Raras se mostram com boa qualidade e mais precisos dos que os obtidos no Projeto Uaupés, eles foram utilizados como base para um novo cálculo dos recursos de Nb no Morro dos Seis Lagos.

6.2.4 Cálculo dos Recursos Minerais de Nb e ETR

As novas análises geoquímicas realizadas no curso do Projeto Terras Raras da CPRM nos anos de 2012 e 2013 permitem a realização de um novo cálculo dos recursos minerais de Nb e ETR. No Projeto Uaupés (1983) foram calculados recursos medido, indicado e inferido.

No presente trabalho foram abordados somente os volumes de recursos medido e indicado, e os parâmetros para o cálculo serão apresentados após os utilizados para o cálculo de cubagem do Projeto Uaupés, uma vez que o mesmo serviu de base para o cálculo realizado no presente trabalho.

6.3 Projeto Uaupés

As análises de teor de Nb_2O_5 (%) nos furos realizados pelo projeto em questão permitira na época um cálculo de recursos na área, que teve como resultado a estimativa do que seria o maior depósito de Nióbio do mundo. Estes recursos foram separados em medido, indicado e inferido.

- **RECURSO MEDIDO:** O recurso medido foi definido como volume dividido em blocos contendo um furo em seu centro.

- 1- O cálculo foi realizado para a região compreendida nas áreas de influência dos 4 furos realizados no Projeto Uaupés. Esses 4 furos distam entre si 150m em uma direção e 125m na outra, formando um retângulo;
- 2- Para cada furo, foi definida uma área de influência onde foi considerado um mesmo teor do que aquele obtido na amostra analisada naquela profundidade;
- 3- Essa área de influência tem dimensões equivalentes a metade da distância entre os furos para cada direção, no caso 150 x 125m, totalizando 18750m²;
- 4- Para cada área de influência, foi definida uma espessura de 5m para definir um sub-bloco de 93750m³ (Figura 17);
- 5- Cada bloco de recurso medido é igual ao somatório entre os 4 sub-blocos para cada fatia;
- 6- Para os blocos limitados pela superfície, foi calculada a área e volume do mesmo a partir de planímetro, sendo considerada a cota superior para o cálculo do volume;
- 7- Considerando que a espessura da crosta laterítica é bem maior do que a profundidade dos furos, foi definida uma extensão abaixo da cota basal dos mesmos (197m) igual à metade da profundidade, totalizando 47m. Portanto, para recurso medido foi considerado o volume partindo do início dos furos até a cota de 150m;
- 8- Para o cálculo do teor de cada bloco, foi considerada a média ponderada dos 4 sub-blocos (áreas de influência de cada furo) de um mesmo horizonte;
- 9- Para o cálculo da densidade, foram utilizadas 17 amostras, contendo aquelas representativas de cada um dos furos, respeitando as diferentes variações da crosta laterítica. O valor obtido foi de 3,84.

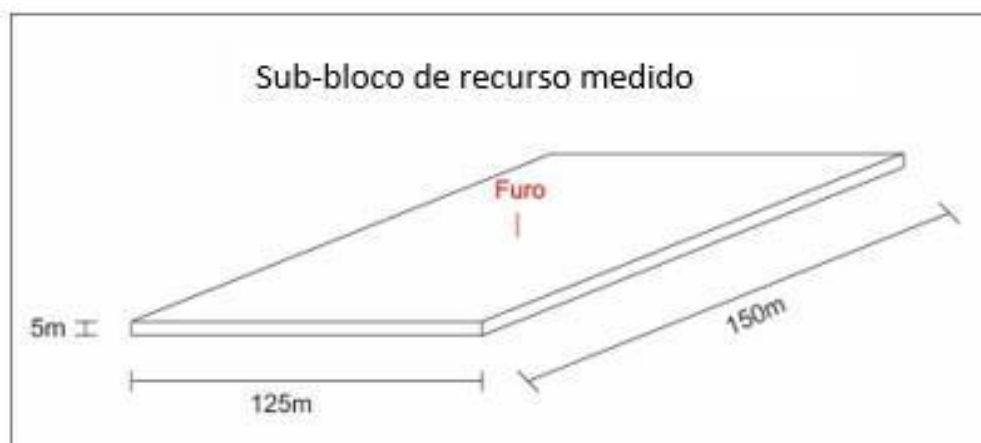


Figura 17. Vista em 3-D de sub-bloco unitário para recurso medido.

- **RECURSO INDICADO:** Foi considerada uma extensão lateral de 200m para a área do recurso medido, além da mesma profundidade, sendo calculado da cota 150m para cima. O teor para cada bloco de recurso indicado é o mesmo do recurso medido na referida cota.
- **RECURSO INFERIDO:** Foi definido como recurso inferido toda a crosta laterítica que recobre o Morro dos Seis Lagos a partir da cota 195m, deduzindo os volumes de recurso medido e indicado. Ao considerar apenas o volume acima da cota de 195m enquanto tem registros de crosta laterítica até a cota de 10m, o relatório do Projeto Uaupés reporta que é uma compensação pelo volume de sedimento contido nos lagos. O teor considerado para cada bloco é o mesmo do bloco adjacente de recurso indicado.

No relatório final do Projeto Uaupés foi também apresentado um perfil esquemático da crosta laterítica com a separação dos recursos medido, indicado e inferido (Figura 18).

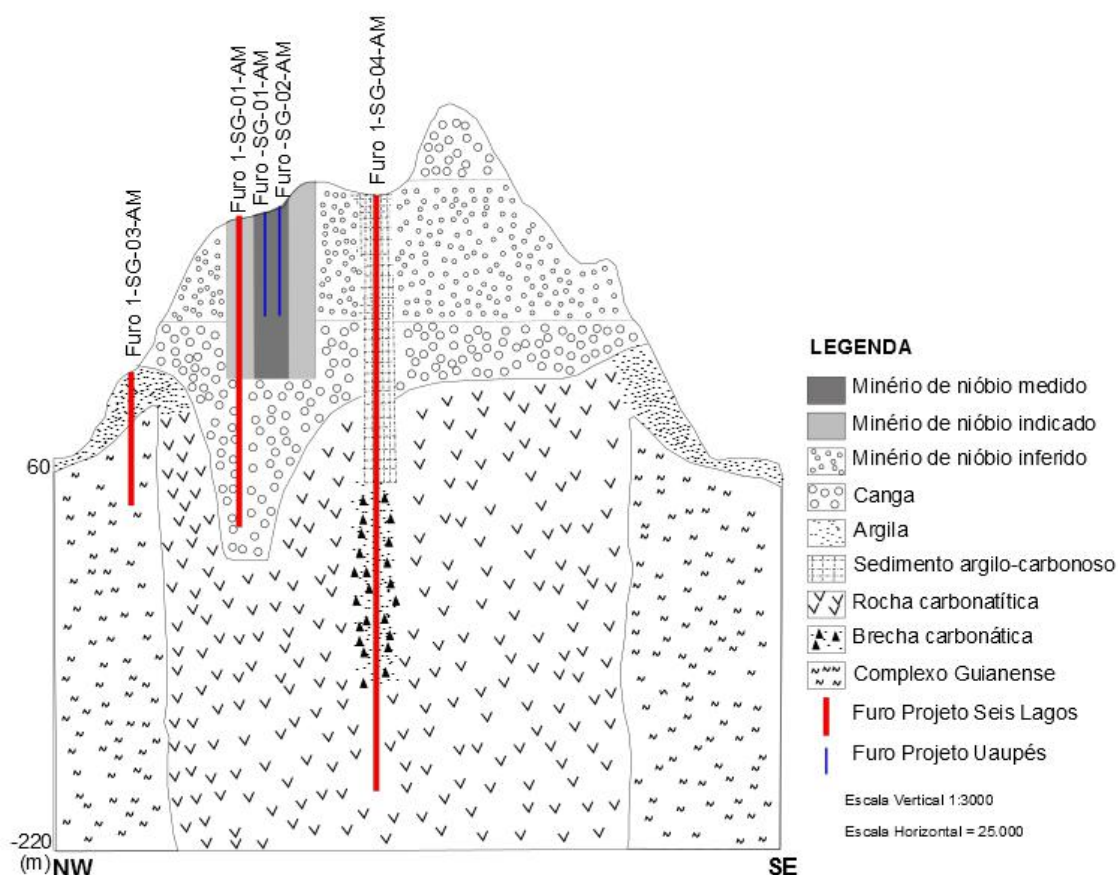


Figura 18. Vista em perfil do Morro dos Seis Lagos com a separação de recurso medido, indicado e inferido. Modificado de Justo (1983) por Lucy Takehara Chemale.

O resultado dos cálculos do Projeto Uaupés foi mostrado na Tabela 1, no capítulo 4.3.

6.4 Cálculo dos recursos de Nióbio

No presente trabalho foi realizado cálculo do volume medido e indicado do recurso mineral de Nióbio, enquanto que não foi abordada a área delimitada de recurso inferido. A grande maioria dos parâmetros utilizados foram os mesmos do Projeto Uaupés (CPRM, 1983), no entanto, algumas notáveis diferenças são apresentadas a seguir.

- 1- Com base nos procedimentos de controle de qualidade analítica, optou-se por utilizar os dados obtidos pelo Projeto Terras Raras, o que implica em uma importante alteração do teor dos blocos previamente calculados;

- 2- No volume de recurso medido foi acrescentada a porção da crosta sob influência dos teores de Nb_2O_5 (%) aferidos no furo 1-SG-01-AM do Projeto Seis Lagos (Figuras 19 e 20). O mesmo é adicionado ao volume sob influência dos 4 furos do Projeto Uaupés, já considerado nos cálculos antigos. Os parâmetros desta adição ao recurso medido seguiram a mesma lógica anteriormente adotada no Projeto Uaupés: trata-se de uma área de 150m x 125m com fatias divididas de 5 em 5m de profundidade. Este furo, apesar de possuir profundidade de 255m, só teve amostras analisadas até os 100m, pois a partir disso a recuperação é baixíssima. Vale também ressaltar que até os 57m a amostragem foi contínua como nos furos do Projeto Uaupés, e de 57 a 100m a amostragem foi pontual;
- 3- O volume de recurso indicado foi reduzido em comparação ao Projeto Uaupés, uma vez que a área de influência da nova porção acrescentada ao recurso medido está totalmente dentro da delimitação de recurso indicado. Em outras palavras, houve um aumento no nível de informações que permitiu melhorar o nível de classificação daquele volume.

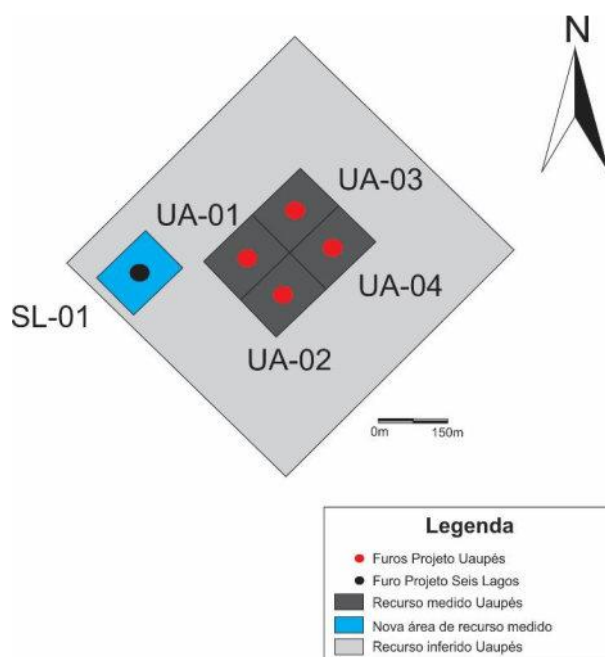


Figura 19. Vista em planta das áreas de recurso medido e indicado, ressaltando a porção sob influência do furo 01-SG-AM realizado no Projeto Seis Lagos que foi acrescentada a área de recurso medido previamente definida no Projeto Uaupés.

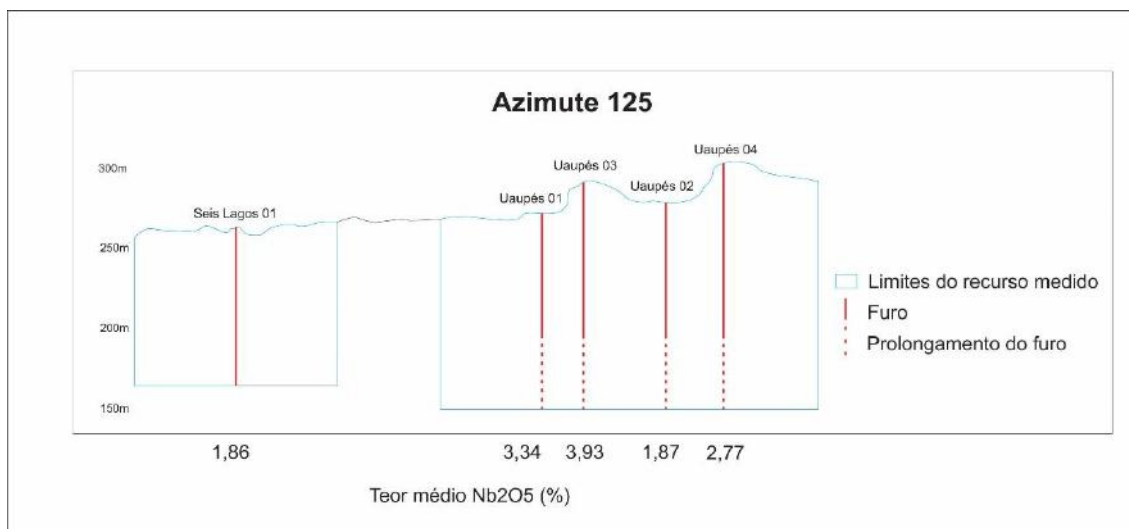


Figura 20. Vista em planta das áreas de recurso medido e indicado, ressaltando a porção sob influência do furo 01-SG-AM realizado no Projeto Seis Lagos que foi acrescentada à área de recurso medido previamente definida no Projeto Uaupés.

O resultado dos cálculos e a comparação com os resultados obtidos nos cálculos anteriores, do Projeto Uaupés, são mostrados a seguir, Tabela 4.

Tabela 4. : Síntese do cálculo de recursos do Projeto Uaupés e do presente trabalho.

| Projeto Uaupés | | | |
|-------------------------------------|---------------|---|--|
| Recurso | Volume (Mt) | Teor médio Nb ₂ O ₅ (%) | Nb ₂ O ₅ contido (Mt) |
| Medido | 38,4 | 2,85 | 1,09 |
| Indicado | 200,6 | 2,40 | 4,82 |
| Inferido | 2659,0 | 2,84 | 755,12 |
| Total | 2898,0 | 2,81 | 814,31 |
| Cálculo de cubagem realizado | | | |
| Recurso | Volume (Mt) | Teor médio Nb ₂ O ₅ (%) | Nb ₂ O ₅ contido (ton) |
| Medido | 45,6 | 2,82 | 1,29 |
| Indicado | 193,4 | 2,90 | 5,61 |
| Total | 239,0 | 2,88 | 6,89 |

Diante dos resultados apresentados, cabem algumas observações:

- O volume de recurso medido aumentou em 7,2 Mt (18,76%). O volume do indicado diminuiu na mesma quantidade de 7,2Mt (3,6%). Isso se deve ao fato da adição do furo 1-SG-01-AM do Projeto Seis Lagos (Viegas Filho & Bonow,

1976) no cálculo do atual trabalho, modificando um volume anteriormente classificado como recurso indicado para recurso medido;

- O teor médio de Nb_2O_5 (%) diminuiu no atual trabalho em comparação com o cálculo antigo. Isso se deve ao fato de os teores do novo furo adicionado ao recurso medido serem mais baixos do que os demais, o que pesou para a média dos teores ser diminuída.

A comparação dos teores médios para cada furo é mostrada na Tabela 5 a seguir.

Tabela 5. Comparação dos teores médios dos projetos Uaupés e Terras Raras.

| | Teores Projeto Uaupés | Teores Projeto Terras Raras |
|--------------------|------------------------------|------------------------------------|
| Furo 01 Uaupés | 3,13 | 3,34 |
| Furo 01 Uaupés | 3,70 | 3,93 |
| Furo 01 Uaupés | 1,88 | 1,87 |
| Furo 01 Uaupés | 2,63 | 2,77 |
| Furo 01 Seis Lagos | Não analisado | 1,86 |

A tonelagem de Nb_2O_5 em milhões de toneladas subiu de 1,09 para 1,29, representando um aumento de 18,35%. (Figura 21).

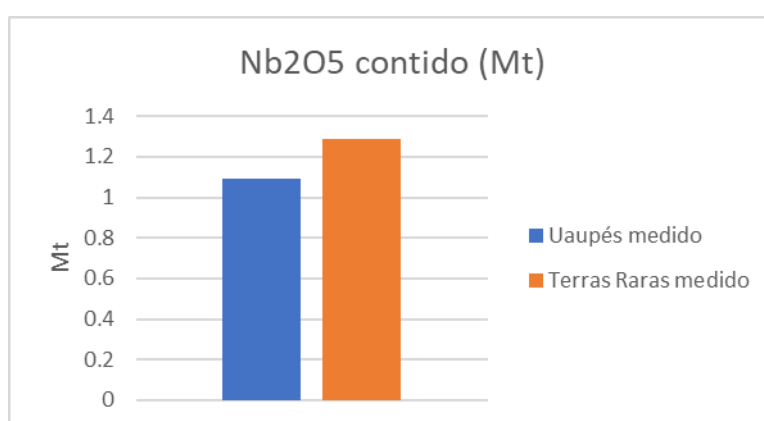


Figura 21. Comparação dos volumes de Nb_2O_5 contidos nos cálculos do Projeto Uaupés com o presente trabalho.

6.5 Curva de Parametrização Teor x Tonelagem

A partir dos cálculos de recurso medido, respeitando o volume e teor medido em cada sub-bloco referente aos 4 furos de sondagem realizados no Projeto Uaupés e ao furo 1-SG-01-AM do Projeto Seis Lagos, foi realizada uma curva de parametrização Teor x Tonelagem para a área do Morro dos Seis Lagos (Figura 22), gerando a Tabela 6. Nessa curva é possível fazer a leitura do minério em milhões de toneladas e o teor do elemento em porcentagem para diferentes cenários de teor de corte que possam ser adotados para uma possível lavra.

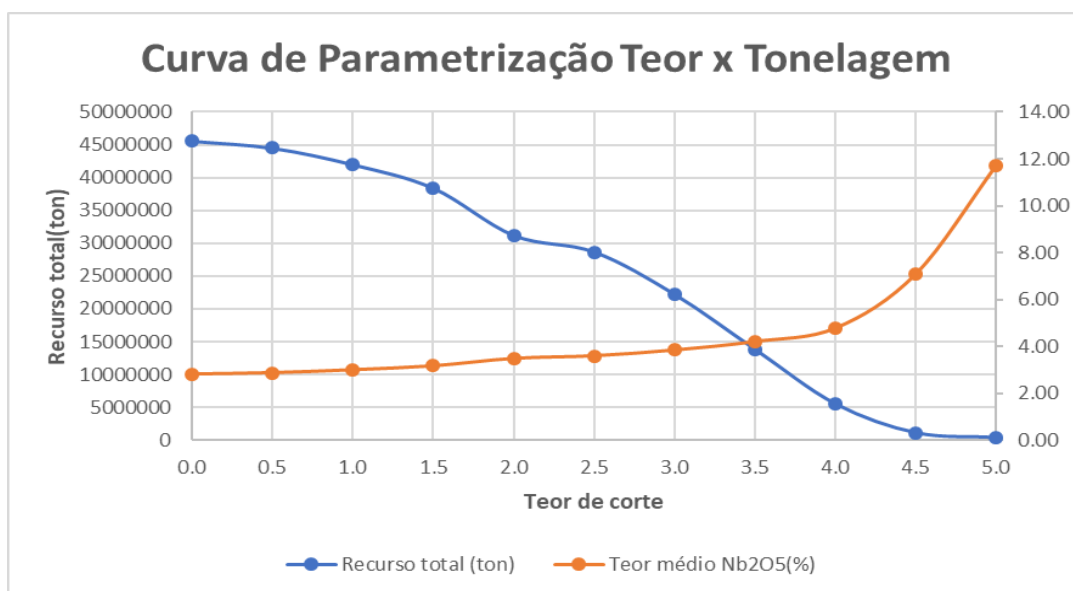


Figura 22. Curva de Parametrização Teor x Tonelagem.

Tabela 6. Recurso total (Mt), Teor médio Nb₂O₅ (%) e Nb₂O₅ contido (Mt) para diferentes teores de corte.

| Teor de corte | Recurso total (Mt) | Teor médio Nb ₂ O ₅ (%) | Nb ₂ O ₅ contido (Mt) |
|---------------|--------------------|---|---|
| Cut-off 0,0% | 45,58 | 2,81 | 1,283 |
| Cut-off 0,5% | 44,50 | 2,87 | 1,278 |
| Cut-off 1,0% | 41,98 | 3,00 | 1,257 |
| Cut-off 1,5% | 38,38 | 3,16 | 1,214 |
| Cut-off 2,0% | 31,18 | 3,48 | 1,086 |
| Cut-off 2,5% | 28,66 | 3,59 | 1,029 |
| Cut-off 3,0% | 22,18 | 3,84 | 0,851 |
| Cut-off 3,5% | 13,79 | 4,20 | 0,579 |
| Cut-off 4,0% | 5,47 | 4,77 | 0,261 |
| Cut-off 4,5% | 1,08 | 7,09 | 0,077 |
| Cut-off 5,0% | 0,36 | 11,72 | 0,042 |

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os métodos estatísticos empregados para avaliação dos dados analíticos mostraram que os resultados obtidos pelo Laboratório SGS Geosol no curso do Projeto Terras Raras em 2012 e 2013 possuem grande precisão, servindo então como base para os cálculos de recursos.

A partir dos resultados do cálculo de volume realizados no presente trabalho foi possível apresentar um novo valor em tonelagem de recursos medido e indicado na área do Morro dos Seis Lagos. A inclusão dos resultados analíticos do furo 1-SG-01-AM do Projeto Seis Lagos (Viegas Filho & Bonow, 1976) resultou em um aumento de 18,76% do volume de recurso medido na área, agora igual a 45,6 milhões de toneladas a um teor de 2,82% de Nb_2O_5 .

A curva de parametrização Teor x Tonelagem se mostra uma boa ferramenta quanto a tomada de decisões para prosseguimento da exploração na área, uma vez que permite a previsão dos parâmetros de teor e tonelagem do depósito para diferentes cenários de valor de corte para mineração no local.

Mesmo considerando um teor de corte de 0% de Nb_2O_5 para a viabilidade econômica da área, o depósito do Morro dos Seis lagos apresenta um valor elevado para este elemento, uma vez que atualmente a produção nacional se dá em Araxá e Catalão com teores entre 0,41% a 2,71% (Pereira Junior, 2016).

Para a sequência da exploração na área do Morro dos Seis Lagos se faz relevante a abordagem de aspectos que visam refinar e aprofundar o conhecimento da área no intuito de fornecer um estudo mais detalhado do depósito.

O uso de softwares de visualização tridimensional em conjunto com o Modelo Digital de Elevação do terreno pode ser utilizado para refinar o cálculo do volume das fatias dos

blocos em contato com a superfície. Através da delimitação do contato da crosta laterítica com o depósito de tálus associado, seria possível definir com boa precisão a área da superfície do morro para incluir no cálculo de recursos inferidos.

No caso de interesse em melhor estimar a área para uma possível lavra, há a necessidade da obtenção de novos dados. A recuperação média dos furos de sondagem foi de apenas 38%. Boa parcela dessa baixa recuperação foi atribuída às cavidades presentes na estrutura do Morro dos Seis Lagos, no entanto, há também a grande possibilidade de métodos mais modernos de sondagem obterem maiores valores de recuperação, que idealmente precisaria ser em torno de 80 a 90%. Uma maior recuperação somada a um adensamento da malha geoquímica de superfície são aspectos necessários para a obtenção de uma maior confiabilidade nos dados para definir os recursos como medido e indicado.

Outro aspecto que poderia ser calculado a partir de métodos mais atuais é a densidade. Essa medida foi calculada por deslocamento de volume como apresentado no Projeto Uaupés, e além disso, as amostras utilizadas para o ensaio foram amostras maciças e em um número não tão expressivo (17). Métodos geofísicos atualmente empregados são capazes de fornecer um modelo mostrando as variações de densidade horizontal e verticalmente ao longo da subsuperfície.

Apesar de ser conhecido um grande depósito mineral de Nióbio, desde o Projeto Seis Lagos (1976) é destacada a relevância de teores de diversos elementos presentes tanto na crosta laterítica quanto nos sedimentos carbonosos e carbonatito presentes na área. Os elementos Fe, Ti, Mn, ETR, W e Sn são potenciais subprodutos ou até mesmo produtos principais de lavra na área, sendo então de grande importância um aprofundamento do estudo dos mesmos, principalmente no aspecto do desenvolvimento dos processos metalúrgicos para a elaboração de uma planta de beneficiamento.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F.F.M. & Hasui, Y. 1984, O Pré-Cambriano do Brasil. São Paulo, Edgard Blücher, 378p.
- ALMEIDA M.E., Pinheiro S. da S., Luzardo R. 2002. Reconhecimento geológico ao longo dos rios Negro, Xié e Içana (Missão Tunuí), Noroeste do estado do Amazonas. CPRM, Manaus, Superintendência Regional de Manaus, 16 p., il.
- BARRON C.N. 1966. Notes on the stratigraphy of Guyana. In: 7nd Guyana Geological Conference, Paramaribo, Proceedings 6, pp. 1-28.
- BERGER, V.I., SINGER, D.A., and ORRIS, G.J., 2009, Carbonatites of the world, explored deposits of Nb and REE— database and grade and tonnage models: U.S. Geological Survey Open-File Report 2009-1139, 17 p. and database [<http://pubs.usgs.gov/of/2009/1139/>].
- BOMFIM, L.F.C. *et al.* Projeto Roraima; Relatório final. BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Produção Mineral. Manaus, convênio DNPM/CPRM, 1974. v. 15.
- CARNEIRO, Tadeu. Nióbio – desenvolvimento tecnológico e liderança. In: MELFI, A.J. *et al.* (eds.) Recursos Minerais no Brasil: problemas e desafios. Rio de Janeiro: Academia Brasileira de Ciências, 2016. p.60-68. ISBN 978-85-85761-40-0.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Amazonas. Manaus: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2006. 125p. CDD 558.811.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. GeoSBG – Geologia.gis. Brasil, 2017. Disponível em: <<http://geosgb.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 20 nov. 2017.
- GIOVANNINI, A. L. *et al.*, 2017. Mineralogy and geochemistry of laterites from the Morro dos Seis Lagos Nb (Ti, REE) deposit (Amazonas, Brazil). Ore Geology Reviews 88, 461-480.

- JUSTO, L.J.E.C., 1983. Projeto Uaupés, v.1. Manaus: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais , 214p. Relatório Final.
- MANDETTA, P. 1970. Datações geocronológicas de rochas do Território Federal de Roraima. Belém, DNPM, 14p., Inédito.
- MITCHELL, R.H., 2015. Primary and secondary niobium mineral deposits associated with carbonatites. *Ore Geology Reviews* 64, 626–641.
- PEREIRA JUNIOR, Ricardo Fernandes. Nióbio. *Sumário Mineral*, Brasília, v.35, p.88-89, 2016. ISSN 0101-2053.
- PINHEIRO, S.S. *et al.* 1976. Geologia. In: RADAM BRASIL – LEVANTAMENTO DE RECURSOS NATURAIS. V. 11. Folha NA-19 Pico da Neblina. 369p.
- RAMSEY, M.H.; THOMPSON, M.; HALE, M. 1992. Objective evaluation of precision requirements for geochemical analysis using robust analysis of variance. *Journal of Geochemical Exploration*, 44, 23-36.
- ROSSONI, M. B. *et al.* Aplicação de técnicas de sensoriamento remoto na investigação do controle do posicionamento do Complexo Carbonatítico Seis Lagos e no estudo do depósito (Nb) laterítico associado (Amazonas, Brasil). *Pesquisas em Geociências*, 43 (2): 111-125, maio./ago 2016.
- ROSSONI, M. B. *et al.* U-Pb zircon geochronological investigation on the Seis Lagos Carbonatite Complex and associated Nb-deposit (Amazonas, Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 80 (2017): 1-17.
- SANTOS, J.O.S. *et al.* 2000. A new understanding of the Provinces of the Amazon Craton based on Integration of Field Mapping and U-Pb and Sm-Nd Geochronology. *Gondwana Research*, 3 (4): 453-488.

- SANTOS J.O.S. *et al.* 2006. A Compartimentação do Cráton Amazonas em Províncias: Avanços ocorridos no período 2000-2006. In: SBG-Núcleo Norte, Simp.Geol. Amaz., 9, Belém, CD-ROM.
- SINCLAIR, A. J.; BENTZEN, A., 1998, Evaluation of errors in paired analytical data by a linear model; in Vallee, M., and A. J. Sinclair (eds.), 1998, Quality assurance, continuous quality improvement and standards in mineral resource estimation; Exploration and Mining Geology, v. 7, nos. 1 and 2, p. 167-174.
- TASSINARI C.C.G.; MACAMBIRA M.J.B. 1999. Geochronological Provinces of the Amazonian Cráton. Episodes, 22 (3):174-182.
- THOMPSON, M.; HOWARTH. R. J., 1978. A new approach to the estimation of analytical precision. Journal of Geochemical Exploration, 9: 23-30.
- UNIDADES DE CONVERSACÃO NO BRASIL (ISA). REBIO Morro dos Seis Lagos. Secretaria do Estado do Meio Ambiente do Amazonas. 09 de março de 1990. Disponível em: <<https://uc.socioambiental.org/uc/4738> acessado em 27/12/2017>. Acesso em: 27 dez. 2017.
- VIEGAS FILHO, J.R., BONOW, C.W., 1976. Projeto Seis Lagos (Relatório interno). Manaus: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais,136p. Relatório Final.
- WOOLLEY, A.R., KJASGAARD, B.A., 2008. Paragenetic types of carbonatite as indicated by the diversity and relative abundances of associated silicate rocks: evidence from a global database. Can. Mineral. 46, 741–752.